

## 概 要

光波をレーダや拡散型無線 LAN に用いる際に、スペックル現象が性能悪化の原因となる。スペックルに起因した受信電力変動の照射体及び送受信光学系依存性の評価は、システム設計上極めて重要である。本論文では、照射直径、散乱物体、受信開口、照射位置変位、送信ビーム広がり角、CW 及びパルスレーザ、というパラメータへの当該受信電力変動の依存性、及びその評価法について検討する。

# 目 次

第 1 章	序論	3
1.1	研究の背景	3
1.2	従来研究	3
1.3	本研究の意義	4
1.4	論文構成	4
第 2 章	スペックル現象の統計的理論、及び光波散乱を伴うシステムの例	6
2.1	スペックルの統計的性質	6
2.1.1	スペックル現象	6
2.1.2	スペックルの確率密度関数	6
2.1.3	スペックルの自己相関関数	8
2.2	科学衛星はやぶさ搭載の LIDAR	10
第 3 章	実験システム	12
3.1	実験構成	12
3.2	実験パラメータ	13
3.2.1	照射直径	13
3.2.2	散乱物体	13
3.2.3	受信開口直径	14
3.2.4	散乱物体上の照射位置変位	14
3.2.5	CW、及びパルスレーザ	14
3.3	フォトダイオード 2 の校正	14
第 4 章	スペックルパターンの暗点、明点の空間的大きさの評価	16
4.1	測定されたパターン	16
4.2	2 種類の空間周波数成分の検討	20
4.3	高い空間周波数成分の評価	21
4.3.1	マイクロサイズの定義	21
4.3.2	マイクロサイズの照射直径、散乱物体依存性	21
4.4	低い空間周波数成分の評価	24
4.4.1	スペックルパターンの空間周波数スペクトル	24
4.4.2	空間周波数スペクトルを用いたマクロサイズの評価	27
4.4.3	マクロサイズを基にした散乱表面のモデル化	28
第 5 章	受信電力変動の受信開口依存性	30
5.1	受信電力変動の受信開口、及び照射直径依存性	30
5.2	受信電力変動の受信開口、及び散乱物体依存性	32

第 6 章	散乱物体上の照射位置変位による受信電力変動	35
6.1	照射位置変位による受信電力変動の統計的評価	35
6.1.1	受信電力変動の評価	35
6.1.2	受信電力変動の照射位置変位 $\Delta X_s$ 依存性の評価	36
6.2	照射位置変位による受信電力変動の照射直径依存性	38
6.2.1	$\Delta X_{sat}$ の照射直径依存性	38
6.2.2	$\Delta X_{sat}$ の照射直径依存性に対する考察	41
6.3	照射光の位相曲面が与える影響の検討	42
第 7 章	連続パルスレーザを用いる散乱光受信システムへの影響	47
7.1	実験構成	47
7.2	散乱前後の波形比較	48
7.3	受信電力のパルス毎の変動	49
7.4	受信電力変動の照射直径依存性	52
第 8 章	結論	53
参考文献		55
発表文献		56
謝辞		57

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

光ワイヤレス技術は、その広帯域・小型軽量・秘匿性等の特徴を生かして、近年、地上通信網への利用に加えて、宇宙開発、高度道路交通システム ITS 等、多岐にわたる分野で研究がされている。地上通信網では、IrDA や光ワイヤレス LAN に見られるように、パソコン及び携帯電話とデータ機器の通信という”最後の 1m”においてケーブルを光波に置き換えている。また、将来需要が急激に増えると予想される宇宙通信においては、大容量通信や超遠距離通信を可能とする光ワイヤレス技術が極めて有効となる。[1]

一方、光ワイヤレス技術は、光学系・光波伝播というワイヤレス独自の問題を有している。屋外においては、大気による吸収・シンチュレーション、室内においては、障害物による遮蔽・多重伝播等である。電波応用分野においては伝播現象がシステム開発と前後して研究されているが、光空間波応用分野では研究が十分とはいえない。

光波伝播において、光の散乱は様々な場面で問題となる。[2] レーザレーダにおいては、ターゲット上でのランバート散乱を利用している。通信チャンネルに散乱体を用いるという研究もされている。また、屋外の光波伝播におけるシンチュレーションも光の散乱現象である。

そのような光波散乱により生じる現象の 1 つに、スペックル現象がある。[3] スペックル現象とは、干渉性の高いレーザ光が物体上で散乱することにより、ランダムな干渉パターンが現れる現象である。1960 年の HeNe レーザ開発とほぼ同時にその存在が指摘され、以来主に光計測の分野で研究が行われてきた。

レーザレーダや拡散型光無線 LAN[4] において、このスペックル現象が性能劣化の原因となる。[5][6] 受信機がスペックルの暗点に置かれると、受信電力が大きく低下してしまう。[7] また、スペックルパターンが高速で変動する場合、信号波形の歪みをもたらす可能性も考えられる。

本研究では、そのような散乱光を受信するシステムを念頭におき、スペックル現象が受信電力に与える影響、及びその照射体、送受信光学系への依存性の評価に関する検討をする。

## 1.2 従来研究

スペックル現象は、その干渉パターン (スペックルパターン) が散乱物体表面の情報を反映していることを用いて、光学計測の分野等で活発に研究が行われてきた。その研究領域は大きく 2 つに分けられる。1 つ目は、スペックルパターンから、散乱物体の表面形状に関する情報を得るという研究分野である。2 つ目は、パターンの変化から、散乱物体の動き、歪等、その状態変化に関する情報を得るという研究分野である。

1 つ目の研究分野に関しては、まず、スペックルパターンの明暗比と物体表面の凹凸の大きさとの関係が研究された。[8] 物体表面の粗面に対応した縞模様が出現するのをを用いて、例えば、乾燥・硬化する塗装、パテあるいは接着剤などの乾燥度計および硬化を予測する装置への応用がされてい

る。さらに、最近では、照射角度を変化させた時のパターン変化から、散乱物体の粒子サイズを区別する研究 [9] や、スペックルを生じさせた散乱光を物体に照射することで、さらに現れるパターンから表面粗さを測定する研究 [10] 等、物体情報を得る様々な手法が検討されている。

2 つ目の研究分野に関しては、変位前後のパターンの自己相関から、物体の変位に対応したスペックルパターンの変位量を検出する手法がよく知られている。[11] スペックルを用いたレーザ速度計として応用されている。また、最近では、この技術を用いて、血流の速度を測定するという研究も報告されている。[12]

### 1.3 本研究の意義

前節において述べたように、スペックル現象は光計測の分野において活発に研究が行われてきた。しかし、それらが主に散乱光の 2 次元パターンより特徴抽出をするものであるのに対し、通信においては、(1) 散乱光のごく一部を有限の受信開口で受信する、(2) 変調をかけたレーザ光を用いる、という特殊性がある。それらの特徴を踏まえた上での、通信に対してスペックル現象が与える影響の検討は、十分に行われていない。

(1) に関しては、スペックルによる受信電力の変動の大きさは、スペックルパターンの暗点、明点の空間的な大きさと受信開口の比に大きく依存している。受信開口がパターンの暗点より十分大きければ、平均化により受信電力はスペックルによる影響をほとんど受けない。これを踏まえて、本研究では、パターンの明点・暗点幅の照射体及び送信光学系依存性の評価を行う。スペックルのパターンサイズに関する研究は、ほとんど行われていない。[13] また、同時に受信電力変動の受信開口依存性を評価する。

(2) に関しては、スペックルパターンの時間的な変化が大きな問題となる。数パルスの時間スケールでパターン変化が生じた場合、パルスによって受信レベルが大きく変動する。一方、パルス幅より高速でパターン変化が生じた場合、信号波形の歪を生じる。

本研究では、パターンの時間的な変化を生じる要因の 1 つとして照射位置変位を考え、受信電力変動の照射位置変位依存性の評価を行う。レーザレーダ等において測定中にターゲットが移動する場合があるためである。照射方向の誤差により照射位置が変化する場合も考えられる。

また、実際に連続パルスレーザを用いて散乱光を受信する測定を行い、受信パルス及びパルス列へのスペックル現象の影響を明らかにする。

### 1.4 論文構成

本論文においては、まず第 2 章で、スペックル現象の統計的理論を紹介する。また、本研究のきっかけとなった宇宙科学研究所の”はやぶさ”ミッションにおける LIDAR について紹介する。

3 章では、実験構成、及び実験器具の校正について述べる。

4 章では、スペックルパターンの暗点、明点の空間的な大きさの照射直径、散乱物体依存性に関する実験的評価を行う。パターンには、理論値に対応した空間周波数が高い成分に加えて、周波数が低い成分が存在することが示される。また、前者についても理論値を超えた大きな分散が明らかになる。

5 章では、スペックルによる受信電力変動の受信開口直径依存性の評価を行う。受信開口拡大による変動の抑圧とパターンの空間的な大きさの対応を示す。

6 章では、照射位置の変位に対する受信電力変動の評価を行う。パターンの暗点と明点を反転さ

せるために必要な照射領域の変位量および、その照射直径依存性を示す。

7章では、実際のパルスレーザシステムの評価実験を行う。スペックルに起因した受信電力のパルス間変動が示される。

8章では、本研究の結論を述べる。

## 第2章 スペックル現象の統計的理論、及び光波散乱を伴うシステムの例

### 2.1 スペックルの統計的性質

#### 2.1.1 スペックル現象

コヒーレントなレーザ光が、波長レベルの凹凸を持つ物体表面で反射する、あるいはランダムな屈折率変動を持つ媒質中を伝播する場合に、ランダムな干渉パターンが形成される。これをスペックル現象と呼び、また、そのランダムパターンをスペックルパターンと呼ぶ。

図 2.1 に、スペックルパターンの例を示す。明点、及び暗点がランダムに分布している。その光強度分布は極めて不規則なものであり、確率的、統計的に扱うのが適している。[14]

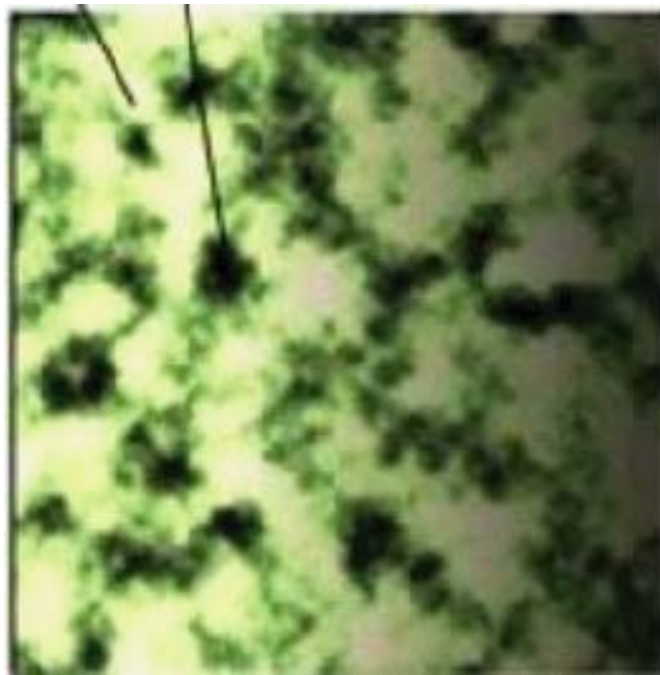


図 2.1: スペックルパターンの例

#### 2.1.2 スペックルの確率密度関数

スペックルは、粗い物体表面においてランダムに散乱された光の干渉により生じる。散乱光が観測点で干渉するモデル図を図 2.2 に示す。観測点において、光路差がランダムに異なる多くの散乱

光が干渉する。

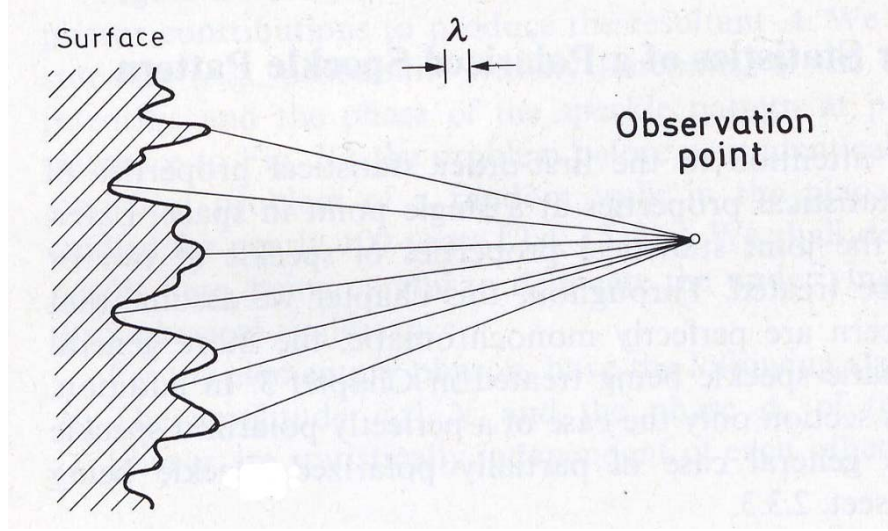


図 2.2: スペックル現象の発生原理

観測点  $(x, y, z)$  における電界  $u(x, y, z; t)$  を以下の式で表す。

$$u(x, y, z; t) = A(x, y, z) \exp[i2\pi f t] \quad (2.1)$$

$f$  は光の周波数である。複素電界  $A(x, y, z)$  は多くの散乱光からの要素の和として以下の式で表される。

$$A(x, y, z) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{N}} a_k(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| e^{i\phi_k} \quad (2.2)$$

以下の2つの統計的性質を仮定する。(i) 各要素の振幅  $a_k/\sqrt{N}$  と位相  $\phi_k$  は統計的に独立である。  
(ii) 位相  $\phi_k$  は  $(-\pi, \pi)$  に一様に分布している。

$A(x, y, z)$  の実部及び虚部に着目する。

$$A^{(r)} = \text{Re} A = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \cos \phi_k \quad (2.3)$$

$$A^{(i)} = \text{Im} A = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \sin \phi_k \quad (2.4)$$

上記の仮定 (i), (ii) より、以下が成り立つ。

$$\langle A^{(r)} \rangle = \langle A^{(i)} \rangle = 0 \quad (2.5)$$

$$\langle [A^{(r)}]^2 \rangle = \langle [A^{(i)}]^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\langle |a_k|^2 \rangle}{2} \quad (2.6)$$

$N$  が極めて大きくなると、 $A^{(r)}$  及び  $A^{(i)}$  は多くの独立なランダム変数の和であるため、ガウス分布となる。(2.5)(2.6) 式より、 $A^{(r)}$  及び  $A^{(i)}$  に関する2次元の確率密度関数は以下の式となる。

$$p_{r,i}(A^{(r)}, A^{(i)}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{[A^{(r)}]^2 + [A^{(i)}]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.7)$$



$$\sigma^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|a_k|^2}{2} \quad (2.8)$$

$A^{(r)} = \sqrt{I} \cos \theta, A^{(i)} = \sqrt{I} \sin \theta$ , により強度  $I$  及び位相  $\theta$  へ変数変換を行うと以下の式となる。

$$p_{I,\theta}(I, \theta) = p_{r,i}(\sqrt{I} \cos \theta, \sqrt{I} \sin \theta) \|J\| \quad (2.9)$$

$\|J\|$  はヤコビアン行列式であり、この場合は  $\|J\| = \frac{1}{2}$  である。電界強度  $I$  に関する確率密度関数  $P_I(I)$  は以下の式、及び図 2.3 となる。

$$p_I(I) = \int_{-\pi}^{\pi} p_{I,\theta}(I, \theta) d\theta = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right) \quad I \geq 0 \quad (2.10)$$

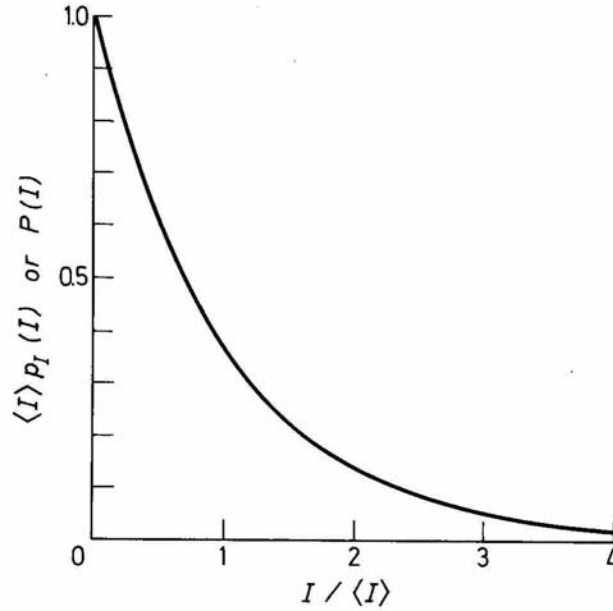


図 2.3: 電界強度  $I$  に関する確率密度関数

### 2.1.3 スペックルの自己相関関数

散乱光の空間伝搬モデルを図 2.4 に示す。散乱物体から距離  $z$  の平面  $(x, y)$  における複素電界  $A(x, y)$  が、着目しているスペックルによる電界分布である。電界の正規化自己相関関数  $\gamma(x_1, y_1, x_2, y_2)$  は下式で表される。

$$\begin{aligned} \gamma(x_1, y_1; x_2, y_2) &= \frac{\langle A(x_1, y_1) A^*(x_2, y_2) \rangle}{[\langle A(x_1, y_1) A^*(x_1, y_1) \rangle \langle A(x_2, y_2) A^*(x_2, y_2) \rangle]^{1/2}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

散乱物体表面の粗さが十分細かいと仮定する。 $(\gamma(\xi_1, \eta_1; \xi_2, \eta_2) \simeq \kappa A'(\xi_1, \eta_1) A'^*(\xi_2, \eta_2) \delta(\xi_1 - \xi_2, \eta_1 - \eta_2))$   $A'(\xi, \eta)$  :  $(\xi, \eta)$  平面での複素電界) フレネルの回折近似式より、対象物体表面に

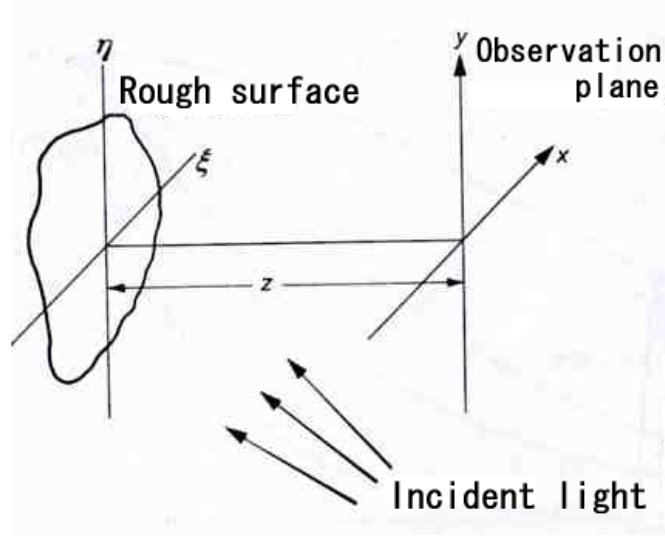


図 2.4: スペックル形成における光の空間伝播

おける光強度の期待値  $P(\xi, \eta)$  と遠方界の観測平面における  $\gamma(x_1, y_1; x_2, y_2)$  の関係は下式となる。

$$\begin{aligned} \gamma(x_1, y_1; x_2, y_2) &= \exp[j \frac{\pi}{\lambda z} (x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2)] \\ &\times \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} P(\xi, \eta) \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda z} (\xi \Delta x + \eta \Delta y)] d\xi d\eta}{\iint_{-\infty}^{\infty} P(\xi, \eta) d\xi d\eta} \end{aligned} \quad (2.12)$$

( $\Delta x = x_1 - x_2, \quad \Delta y = y_1 - y_2$ )

$\gamma$  と  $P(\xi, \eta)$  はフーリエ変換の関係にある。

照射領域を、 $L \times L$  の正方形で照射光強度一定と仮定すると、

$$|P(\xi, \eta)|^2 = \text{rect} \frac{\xi}{L} \text{rect} \frac{\eta}{L} \quad (2.13)$$

$$(\text{rect}(x) = 1 \text{ for } |x| \leq \frac{1}{2}, 0 \text{ otherwise})$$

であるため、強度の自己相関関数は以下の式、及び図 2.5 となる。

$$\gamma(\Delta x, \Delta y) = [1 + \text{sinc}^2 \frac{L\Delta x}{\lambda z} \text{sinc}^2 \frac{L\Delta y}{\lambda z}] \quad (2.14)$$

$\text{sinc}^2(L\Delta x/\lambda z)$  が最初に 0 となる  $\Delta x$  の値をスペックルパターンの平均的な幅とみなすことができる。すなわち、パターンの明点あるいは暗点の平均的な幅は、 $\lambda z/L$  と導かれる。

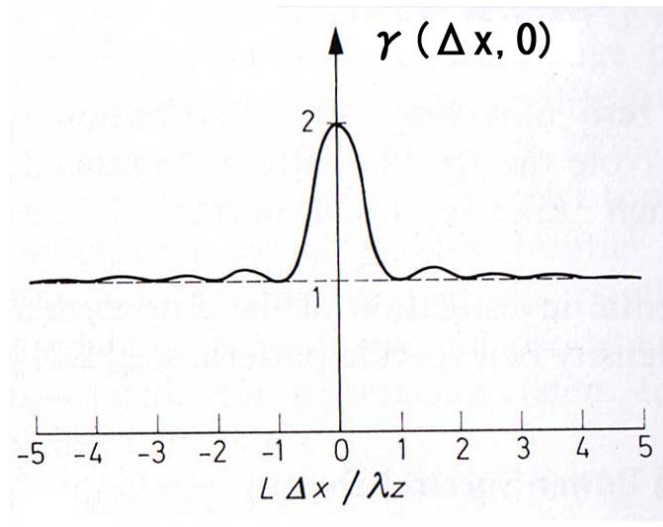


図 2.5: 照射領域が正方形、かつ一様光強度の場合の自己相関関数

## 2.2 科学衛星はやぶさ搭載の LIDAR

”はやぶさ”ミッションは、小惑星 ITOKAWA に到達しサンプルを採取して帰還する惑星ミッションである。深宇宙ミッションであるため小惑星への着陸航法には高度な自立性が要求されており、”はやぶさ”ではカメラ画像とレーザ高度計を基本とした航法システムを採用している。この航法システムの要となるレーザ高度計が、パルスレーダ方式を採用した小型軽量 LIDAR(Light Detection And Ranging) である。[15]

LIDAR は、レーザ光源より対象物体に対して光パルスを照射し、対象物体からの反射パルスを受信するまでの時間を測定することにより、対象物体との距離を測定するシステムである。

実際に科学衛星はやぶさに搭載された LIDAR の諸特性及び基本構成を表 2.1 及び図 2.6 に示す。小惑星への着陸時に用いるため、測距範囲は 50m から 50km と極めて広い。レーザ光源として LD(Laser Diode) 励起の Q スイッチ Nd:YAG レーザを用いており、パルス幅は 14nsec、エネルギーは 10mJ、ビーム径  $\Phi 3\text{mm}$ 、広がり角  $\Phi 0.5\text{mrad}$  である。受信光学系は直径 126mm の SiC 製カセグレン望遠鏡で、視野は 1mrad である。

送信レーザを発射した時刻でタイミングクロックを開始し、小惑星からの反射光を受信した時刻でカウントを停止する。タイミングクロックは 75MHz で、半クロックが 6.7nsec となり、光の速度で 1m を往復する速度に相当する。そのため、S/N が良い 50m での近距離測定精度はタイミングクロックの周波数で決められ  $\pm 1\text{m}$  となる。

反射光は、距離及び小惑星の反射率からダイナミックレンジが  $10^6$  と非常に広いため、LIDAR は AGC (Automatic Gain Control) 機能を有している。AGC とは、受信波に対する増幅回路のゲインを制御し、信号処理回路に入力される受信信号レベルを一定範囲に保つことである。本システムでは、受信パルス 100 回の平均をとってゲイン制御を行っている。

表 2.1: はやぶさ搭載 LIDAR の特性

測距範囲	50m~50km
時間分解能	1pps
波長	1064 nm
出力	10 mJ
パルス幅	14 nsec
送信光広がり角	$\Phi 0.5\text{mrad } (1/e^2)$
受信光学系	$\Phi 126\text{mm SiC}$
小惑星反射率	0.05~0.14 (完全拡散面)
寸法	240mm × 228mm × 250mm

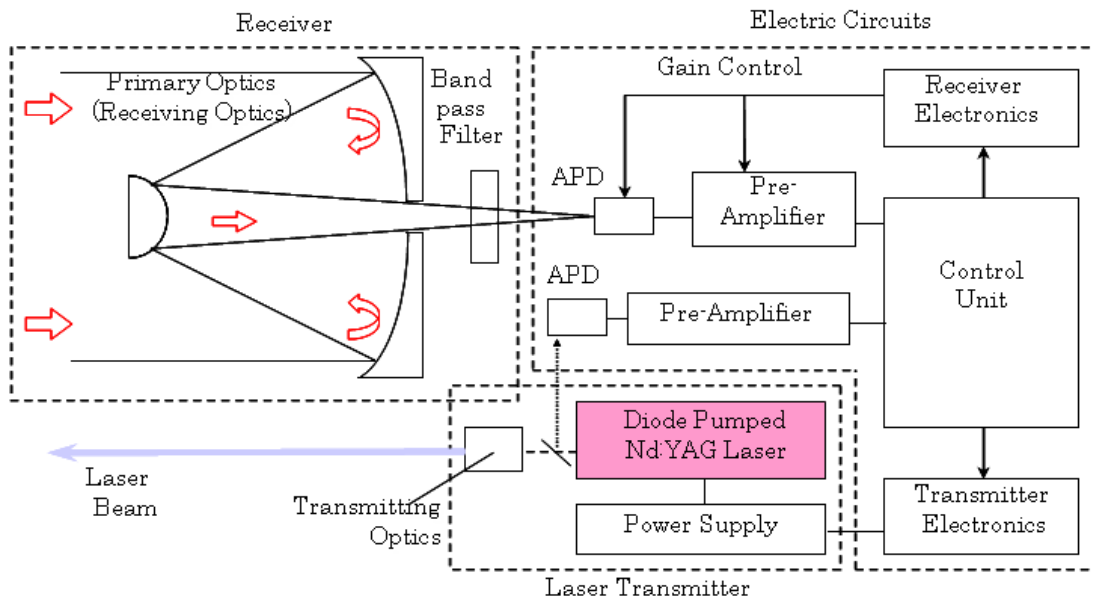


図 2.6: はやぶさ搭載 LIDAR の基本構成

## 第3章 実験システム

### 3.1 実験構成

スペックル現象測定的基本的实验構成を、図 3.1 に示す。レーザ光を散乱物体に照射する。散乱物体には、紙（コピー紙）、木板（広葉樹で、表面は鉋がけされている）、紙やすり（＃80）を用いる。用いたレーザはYAG レーザであり、その特性を表 3.1、3.2 に示す。波長は532nm であり、パルスレーザの繰り返し周波数は 20Hz である。

第4章、5章のスペックルパターンの1次元測定では、フォトダイオードを散乱方向に垂直 ( $X_r$  方向) に掃引し光強度分布を測定する。CW レーザを用い、レンズにより照射直径を変化させる。散乱物体と受信機との距離は1m とする。5章では、直径0.1mm, 0.4mm, 1mm, 9.5mm のピンホールを受信PD に用いて、受信開口直径を変化させる。

第6章の照射位置変位に対する受信電力変動の測定では、ターゲットをレーザ照射方向に対して垂直方向 ( $X_s$  方向) に変位させ、受信電力の時間的変化を測定する。CW レーザを用い、受信PD は固定する。

第7章ではパルスレーザを用い、フォトダイオードによる散乱光の受信波形をオシロスコープで測定する。6章及び7章の実験では、散乱物体と受信機との距離を2m とする。

また、図 3.1 では省略してあるが、CW レーザを用いた4~6章では、レーザ出力光の一部をフォトダイオード2で受信し、レーザ出力の変動を散乱光の測定と同時にを行った。送信パワーそのものの変動を散乱光の光強度分布として測定してしまうのを防ぐためである。

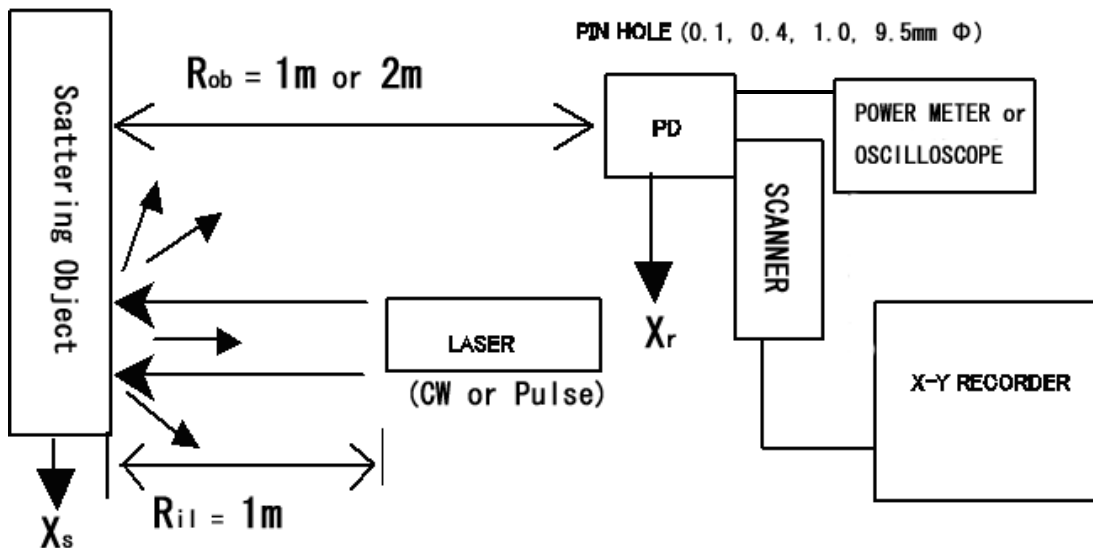


図 3.1: スペックルパターン測定の実験構成

表 3.1: CW レーザの特性

Wave length	532nm
CW Output	25mW
Transverse mode	TEM00
Beam angle (full width)	2mrad
Beam radius (1/e2)	0.36mm
Coherence length	10mm

表 3.2: パルスレーザの特性

Wave length	532nm
Pulse width	2.5ns
Repetition rate	20Hz
Beam angle (full width)	0.5mrad
Beam radius	0.95mm
Coherence length	160mJ

## 3.2 実験パラメータ

本実験において変化させるパラメータ、及びその意義を述べる。

### 3.2.1 照射直径

散乱物体上の照射領域の直径である。本実験では、レーザ光をレンズ ( $f=20\text{cm}$ ) を通して物体に照射し、レンズ・物体間の距離を変えることで照射直径を変化させる。照射直径は、レーザのビーム広がり角、レーザ・レンズ間の距離、レンズの焦点距離、レンズ・物体間の距離から算出する。

実際のシステムでは、散乱物体上の照射直径  $D_{il}$  は以下の式で表される。

$$D_{il} = \text{Min}(\theta_b R_t, D_s) \quad (3.1)$$

ただし、 $\theta_b$ :ビーム広がり角、 $R_t$ :送信機・散乱物体間の距離、 $D_s$ :散乱物体の直径、である。惑星着陸用 LIDAR のようにターゲットが十分に大きい場合は、 $D_{il} = \theta_b R_t$  となる。一方、宇宙ごみのレーザレーダによる検出のような場合では、ターゲットがビーム径より小さい場合も考えられ、その場合は、ターゲットそのものの大きさが照射直径となる。

スペックル現象の照射直径依存性は、このような様々なシステム設計の基礎となる、極めて重要な特性である。

### 3.2.2 散乱物体

散乱物体としては、紙 (コピー紙)、木板 (広葉樹で、表面は艶がけされている)、紙やすり (#80) の3種類を用いる。紙および木板は室内の壁や天井での散乱を想定した材質である。紙やすりは、惑星や宇宙ごみの表面を想定した材質である。なお、表面粗さの異なる紙やすり等、他の散乱物体を用いた測定も行ったが、目立った違いが見られなかったため本論文では、省略する。

### 3.2.3 受信開口直径

本実験では、異なる大きさのピンホールを用いることで、等価的に受信開口直径を変化させる。スペックル現象による受信電力変動を防ぐには、開口を十分大きく設計すればいいのは明らかであるが、コスト、スペース及び重量との間でトレードオフの関係となる。

### 3.2.4 散乱物体上の照射位置変位

本実験では、散乱物体を微動台により変位させ、照射位置を変化させる。LIDAR 等で測定中にターゲットが動く場合及び、ビーム送信方向が変化する場合に照射位置変位が生じる。

照射位置の変位によるパターン変化は波形歪の原因となりうる反面、受信機の位置を暗点から明点に変えることができるという点で、有利な現象と考えることもできる。すなわち、受信機が暗点にあり受信電力がとれない場合に、送信機のビーム送信方向を変化させる等、照射位置の変位を生じさせ、受信機の位置を明点に反転することが可能となる。そのような、システム設計の基礎データとして、照射位置変位による受信電力変化の測定を行う。

### 3.2.5 CW、及びパルスレーザ

本論文では、まず前節までに挙げたパラメータへのスペックル現象の依存性を CW レーザを用いて明らかにする。実際のレーザレーダ及び通信では光のパルス列が照射されるのだが、数 ns という極めて短いパルス幅を持つパルスレーザより、CW レーザを用いた方が測定が容易であるためである。その後に、パルス光を照射する場合の実験を行い、CW により得られた結果との対応を示す。

## 3.3 フォトダイオード 2 の校正

第 4,5,6 章において CW レーザの送信光強度測定に用いる、フォトダイオード 2 の入出力特性の校正（入力と出力が線形であることの確認）を行う。図 3.2 に実験構成を示す。レーザとフォトダイオードの間に 2 つの偏光器を配置し、1 つ目の偏光器の偏光方向を変えることによりフォトダイオードへの入力電力を変化させる。

レーザ出力電力を  $P_0$  とすると、2 つの偏光器通過後の電力  $P_1$  は下式となる。

$$P_1 = \cos^4 \theta P_0 \quad (3.2)$$

フォトダイオードへの入力電力は、 $\cos^4 \theta$  に比例する。

フォトダイオードの出力電圧と  $\cos^4 \theta$  の関係の測定結果を図 3.3 に示す。今回測定した入力電力範囲では、両者の間に比例関係がはっきりと見られており、フォトダイオードの入力、出力間の線形関係が確認される。

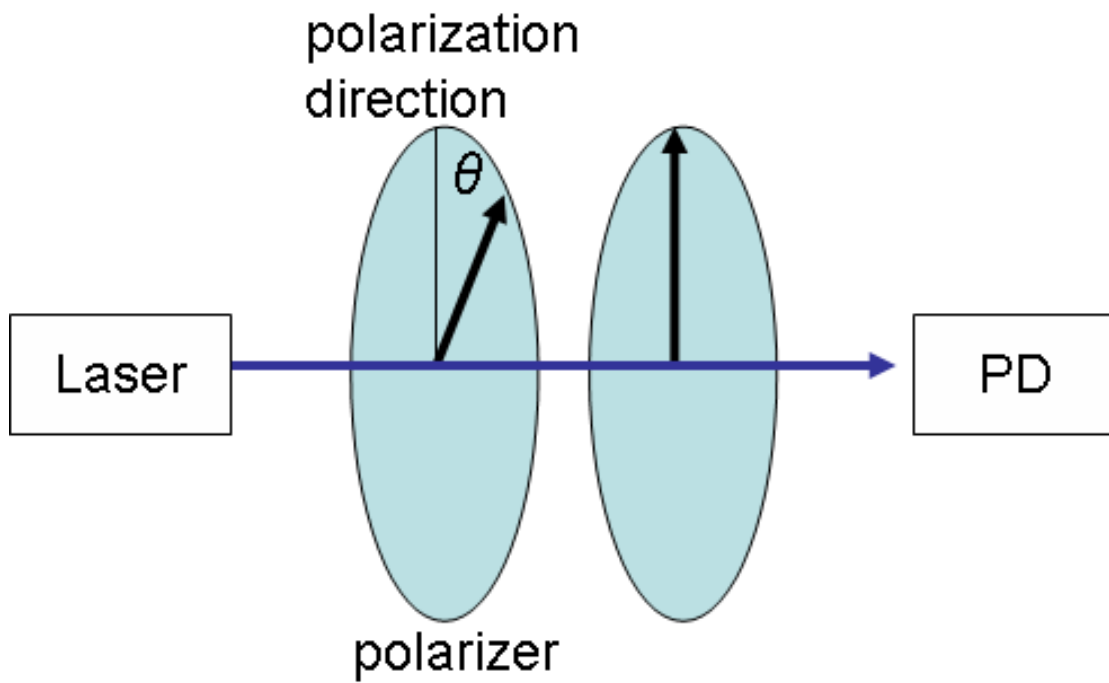


図 3.2: フォトダイオード校正の実験構成

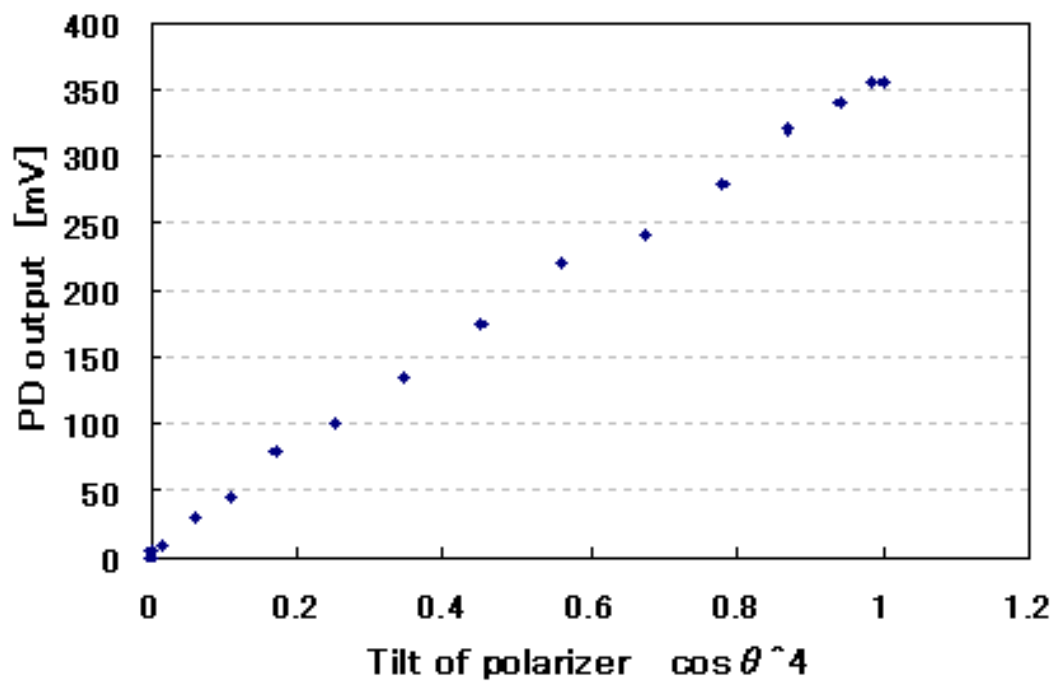


図 3.3: 偏光器の偏光角度に対する PD 出力



## 第4章 スペックルパターンの暗点、明点の空間的大きさの評価

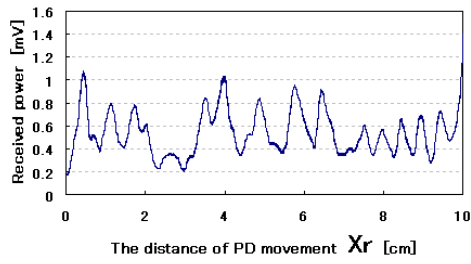
### 4.1 測定されたパターン

測定された紙からのスペックルパターンを図 4.1 に示す。(b) では、受信電力が 20mV から 85mV まで、大きく変動し、鋭いピークが見られる。照射直径  $D_{il}$  を増加すると、パターンの空間周波数が高くなり、より鋭いパターンが現れている。

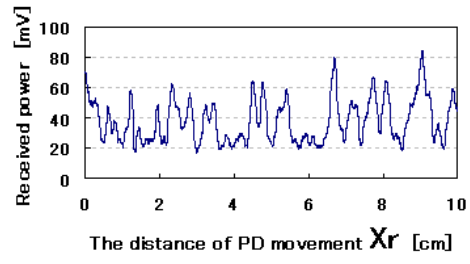
また、 $D_{il} = 0.3mm \sim 1.0mm$  においては変動の大きさは照射直径に依らず同程度であるが、 $D_{il} = 2mm \sim 8mm$  においては照射直径を増加すると変動の大きさは減少する。受信フォトダイオードの開口内でのパターンの平均化により、変動が抑えられている。なお、(a),(c),(e) では平均受信電力が低くなっているが、これは照射光強度を弱めて測定しているためである。(この照射直径の場合には5章の測定もまとめて行ったため、受信開口拡大しても受信電力を測定可能範囲に収める必要があったため。)

木板と紙やすりの場合のスペックルパターンを図 4.2、4.3 に示す。受信電力の平均値や変動の大きさは散乱物体に大きく依存するが、パターンの幅（空間周波数）に関しては、照射直径によって決まり散乱物体には依存しない特性が見られる。

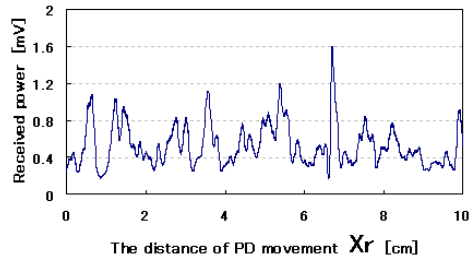
紙の場合と比べて、木板及び紙やすりの場合のパターンは変動が大きい。これは、前者に比べて後者の方が物体表面の凹凸が激しいためである。一方、紙やすりは極めて激しい凹凸を持つにもかかわらず、鉋をかけた木板からのパターンと同程度の変動の大きさである。これは、表面凹凸が波長の数倍以上となると、パターンの変動の大きさは飽和するためである。[3] すなわち、木板表面の凹凸は波長  $0.5\mu m$  の数倍を超えていると考えられる。



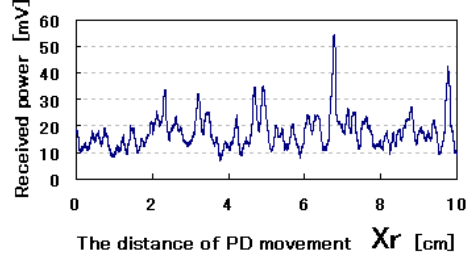
(a)  $D_{il}=0.3\text{mm}$



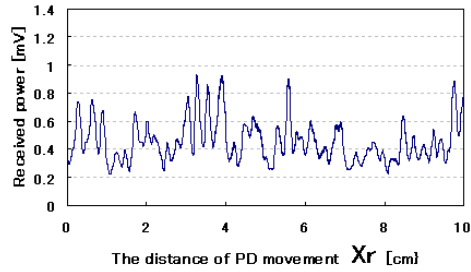
(b)  $D_{il}=0.5\text{mm}$



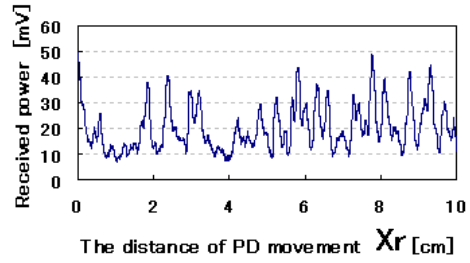
(c)  $D_{il}=0.6\text{mm}$



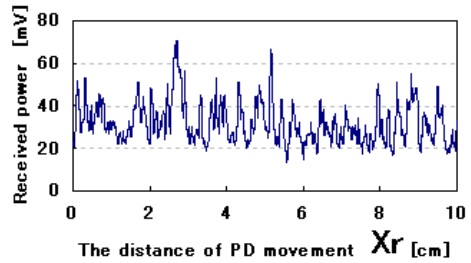
(d)  $D_{il}=0.7\text{mm}$



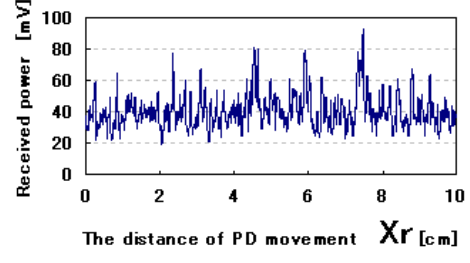
(e)  $D_{il}=0.8\text{mm}$



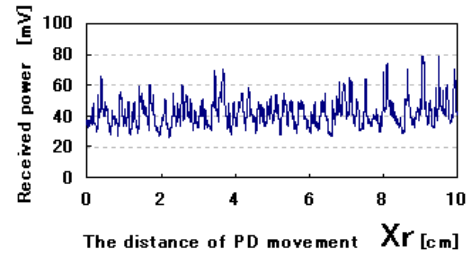
(f)  $D_{il}=1.0\text{mm}$



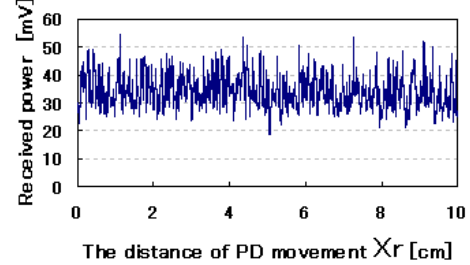
(g)  $D_{il}=2.0\text{mm}$



(h)  $D_{il}=2.3\text{mm}$

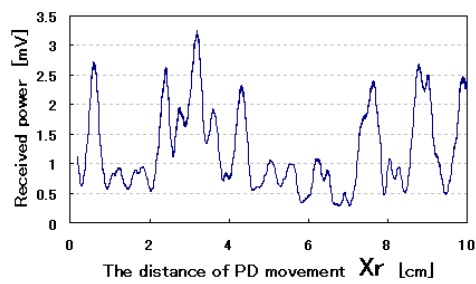


(i)  $D_{il}=3.5\text{mm}$

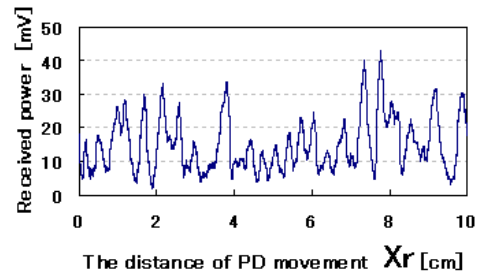


(j)  $D_{il}=8.5\text{mm}$

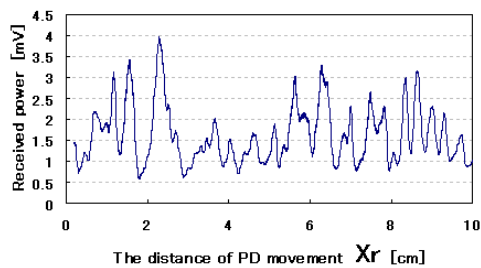
図 4.1: 紙からのスペックルパターンの照射直径依存性



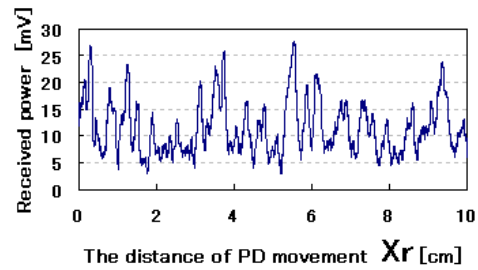
(a)  $D_{il}=0.3\text{mm}$



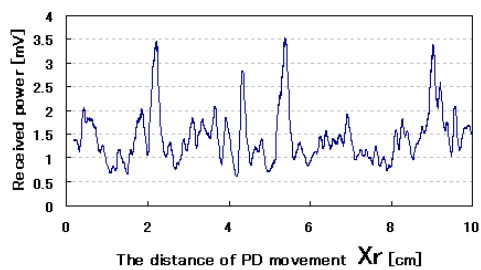
(b)  $D_{il}=0.5\text{mm}$



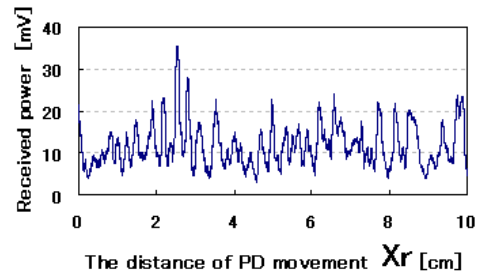
(a)  $D_{il}=0.6\text{mm}$



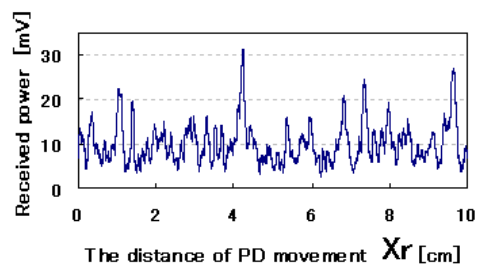
(b)  $D_{il}=0.7\text{mm}$



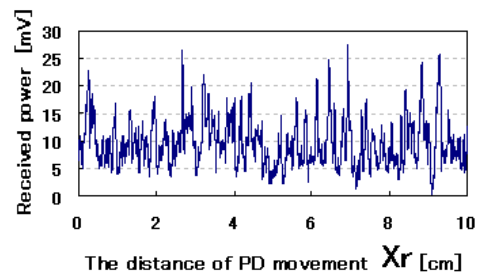
(a)  $D_{il}=0.8\text{mm}$



(b)  $D_{il}=1.0\text{mm}$

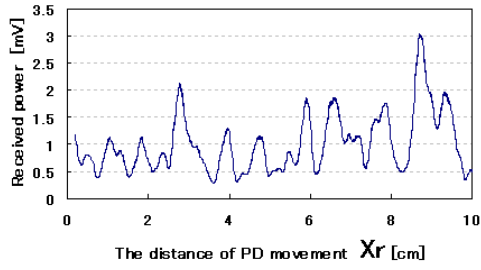


(c)  $D_{il}=1.3\text{mm}$

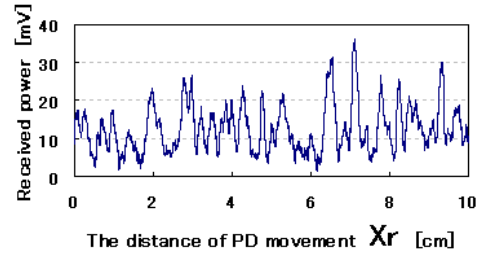


(d)  $D_{il}=2.3\text{mm}$

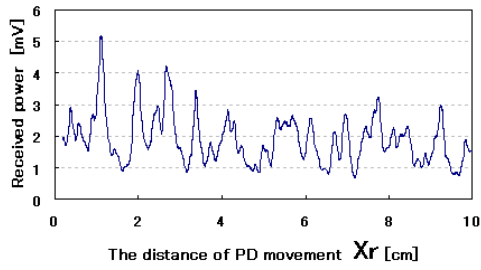
図 4.2: 木板からのスペックルパターンの照射直径依存性



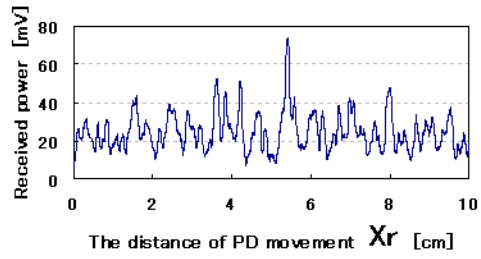
(a)  $D_{il}=0.3\text{mm}$



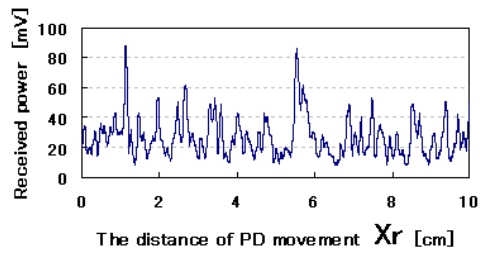
(b)  $D_{il}=0.5\text{mm}$



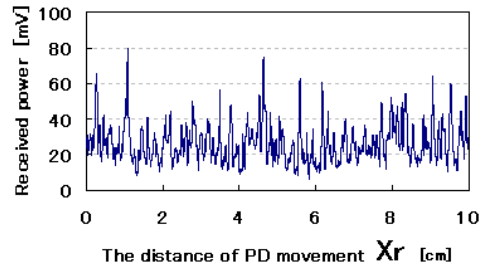
(a)  $D_{il}=0.6\text{mm}$



(b)  $D_{il}=0.7\text{mm}$



(c)  $D_{il}=1.0\text{mm}$



(d)  $D_{il}=2.3\text{mm}$

図 4.3: 紙やすりからのスペクルパターンの照射直径依存性

## 4.2 2種類の空間周波数成分の検討

スペックルパターンの明点及び暗点の空間的大きさは、受信電力への影響を考える上で重要である。そのため、前節において測定されたパターンについて、その明点及び暗点の幅についての評価を行う。

スペックルパターンにおいて、パターンの鋭さが明点、暗点の空間的大きさに対応している。そこで、図 4.4 の短い矢印に示すようなパターンのビーム幅をマイクロサイズとして評価する。これは、2.1 節において示した従来の理論により導かれる、パターンの空間的サイズに対応している。

一方、木板からのスペックルパターンには、図 4.4 の長い矢印に示すような大きな周期が見られる。マクロな視点からは、これを明点、暗点のサイズと見なすことができる。このような数 cm 程度のパターンの大きな周期をマクロサイズとして評価する。

図 4.1 より、照射直径の増加によりマイクロサイズは減少する特性が見られる。また、図 4.2、4.3 と比較すると、マイクロサイズは照射直径が同じであれば散乱物体に依らず同程度である特性がある。

マクロサイズについては、図 4.2(a),(b),(c),(d),(e),(f),(h) において、3 ~ 5cm の周期が見られる。照射直径を増加しても、マクロサイズは変化しない特性がある。特に、図 4.2 において照射直径が 0.7mm 以下の場合に、周期が顕著に現れている。一方照射直径が 1mm 以上となると、マクロサイズは高周波成分に埋もれてしまう。また、紙や紙やすりの場合にも、図 4.1(e)、図 4.3(a)、(c)、(f) のように、木板の場合ほど顕著ではないものの、数 cm の周期が見られる場合もある。

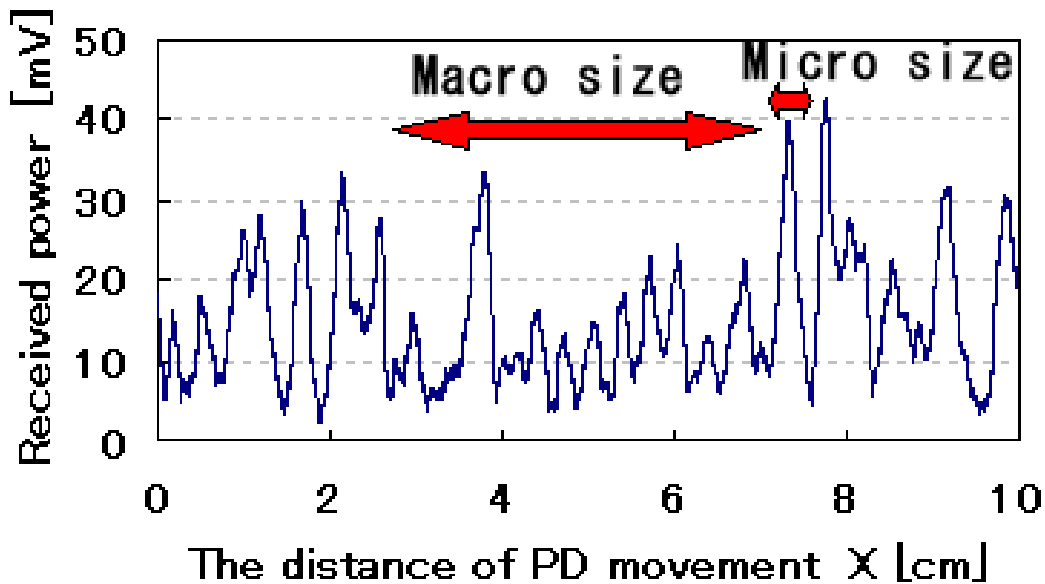


図 4.4: パターン内に存在する高い空間周波数成分（マイクロサイズ）と低い空間周波数成分（マクロサイズ）

## 4.3 高い空間周波数成分の評価

### 4.3.1 ミクロサイズの定義

パターンの自己相関が 0 となる時の変位をミクロサイズと定義する。従来のパターン幅の定義と同じである。(2 章参照) 実験結果の光強度変動からその平均値 (オフセット) を引いたデータについて、自己相関を求める。このように評価されるミクロサイズは、パターンの一つの明点において、光強度がピークから平均値まで下がる間の距離に対応している。よって、ミクロサイズを用いてパターンの鋭さを評価できる。

自己相関関数は、平均が 0 のデータ  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}$  に対して、

$$\gamma(l) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-l-1} x_{t+l} x_t \quad (4.1)$$

で定義される。自己相関関数とミクロサイズの例を図 4.5 に示す。

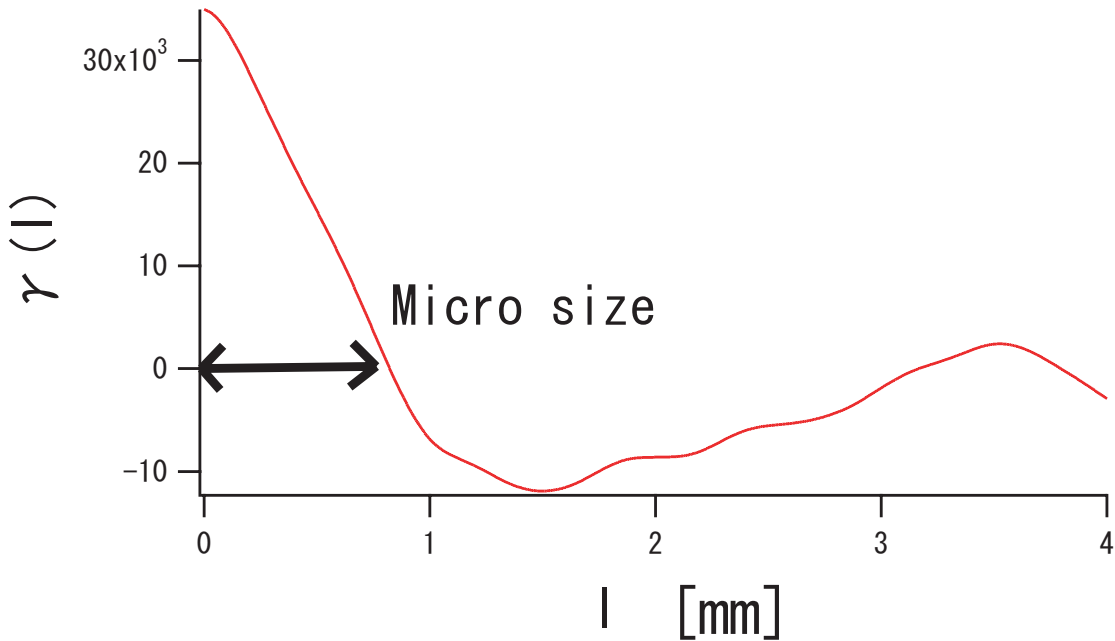


図 4.5: ミクロサイズの定義

### 4.3.2 ミクロサイズの照射直径、散乱物体依存性

散乱物体が紙の場合のスペックルパターンの自己相関の一部を図 4.6 に示す。 $\gamma(l) = 0$  となる  $l$  は、(a) では  $l=0.42$  [cm] であるのに対して、照射直径の増加により減少し、(d) では、 $l=0.2$  [cm] 程度となる。これら  $l$  の値が、ミクロサイズである。

散乱物体が紙の場合におけるミクロサイズの照射直径依存性を図 4.7 に示す。全体としては、ミクロサイズは理論通り照射直径  $D_{il}$  に反比例する。 $D_{il}=0.3$  mm ではミクロサイズは 4.6 mm であるのに対し、 $D_{il}=8.5$  mm ではミクロサイズは 0.4 mm となる。

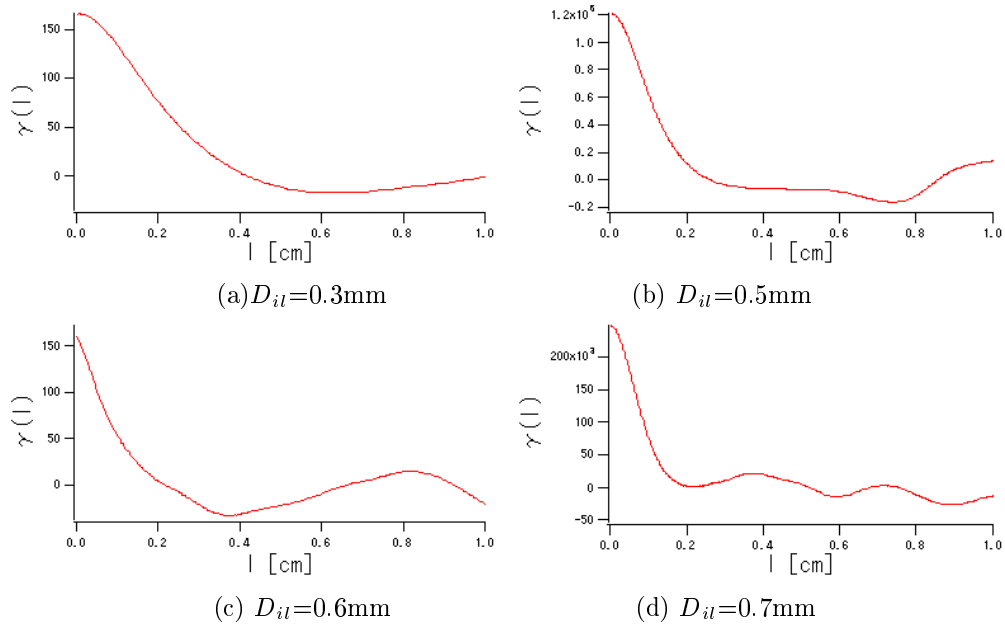


図 4.6: スペックルパターンの自己相関 (散乱物体：紙)

一方、マイクロサイズの値は理論値の  $\lambda R_{ob}/D$  より 2 倍以上大きな値となっている。この原因は 2 つある。1 つ目は、理論では物体表面の凹凸を十分ランダムな白色雑音として処理していることによる誤差である。2 つめは、理論では照射領域は一辺  $D_{il}$  の正方形で照射光強度一定として計算しているのに対し、実際には照射領域は直径  $D_{il}$  の円で照射光強度も一定でないことから生じる誤差である。すなわち、実際にはより照射領域の中心部分の光強度が強いため、より空間周波数の低い成分が生じるのである。

図 4.7 の照射直径 2mm あるいは 2.3mm の場合のように、理論から外れてマイクロサイズが大きくなる場合がある。局所的に大きな明点あるいは暗点が現れるためである。図 4.1(g) において、 $X_r=12\text{mm}$  に幅 5mm 程度の暗点、 $X_r=27\text{mm}$  に幅 5mm 程度の明点が見られる。照射領域内のより近接した散乱粒子間での強い干渉パターンが生じているためである。

このように、一つのパターン内において大、小のサイズの明点及び暗点が混在する。このばらつきの評価を行う。スペックルパターンを 5mm 区間ごとに 20 分割し、各部分のパターンについて自己相関を用いてマイクロサイズを求める。各部分より算出された値のばらつき (標準偏差) を、マイクロサイズの分散として評価する。マイクロサイズのばらつき (標準偏差) を図 4.7 のエラーバーによって示す。 $D_{il}=2.0\text{mm}$  の場合には、マイクロサイズは 1mm から 3.5mm で分散している。マイクロサイズは平均値と同程度の大きな分散を持つ。

マイクロサイズの散乱物体依存性を図 4.8 に示す。木板、紙やすりの場合のマイクロサイズは、紙の場合と完全には一致しないが、図 4.7 のエラーバーに比べると微差である。 $D_{il}=0.7\text{mm}$  の場合の紙、木板、紙やすりのマイクロサイズは順に、1.9mm、2.3mm、2.3mm であるのに対して、図 4.7 の  $D_{il}=0.7\text{mm}$  におけるマイクロサイズの分散は 1.5mm ~ 5.9mm と大きい。すなわち、マイクロサイズは散乱物体に依存せず、照射直径に反比例しているといえる。

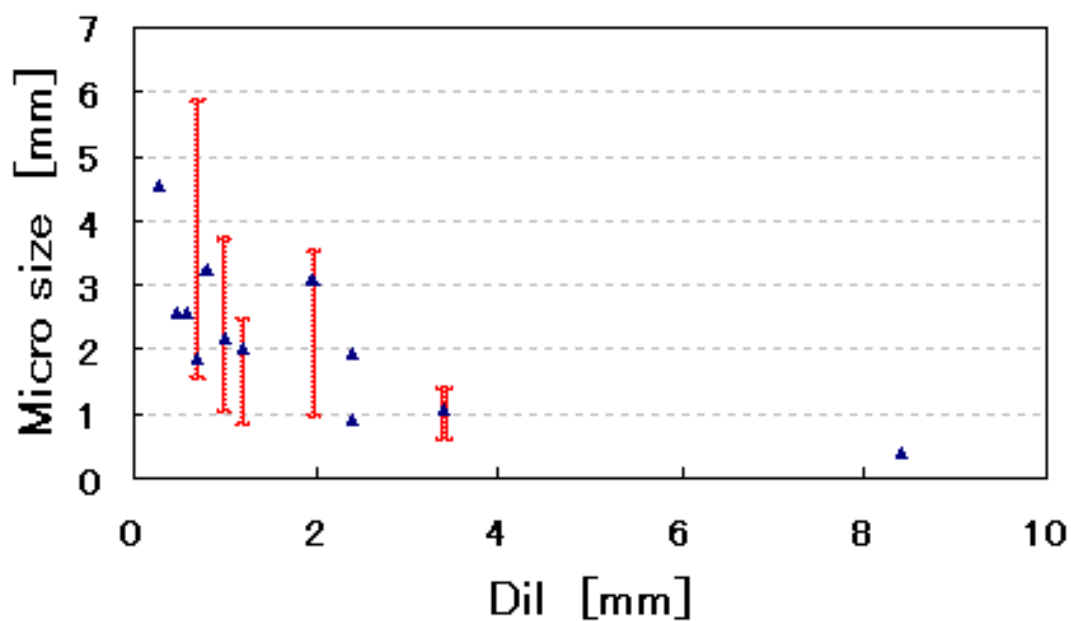


図 4.7: ミクロサイズの照射直径依存性 (散乱物体:紙)

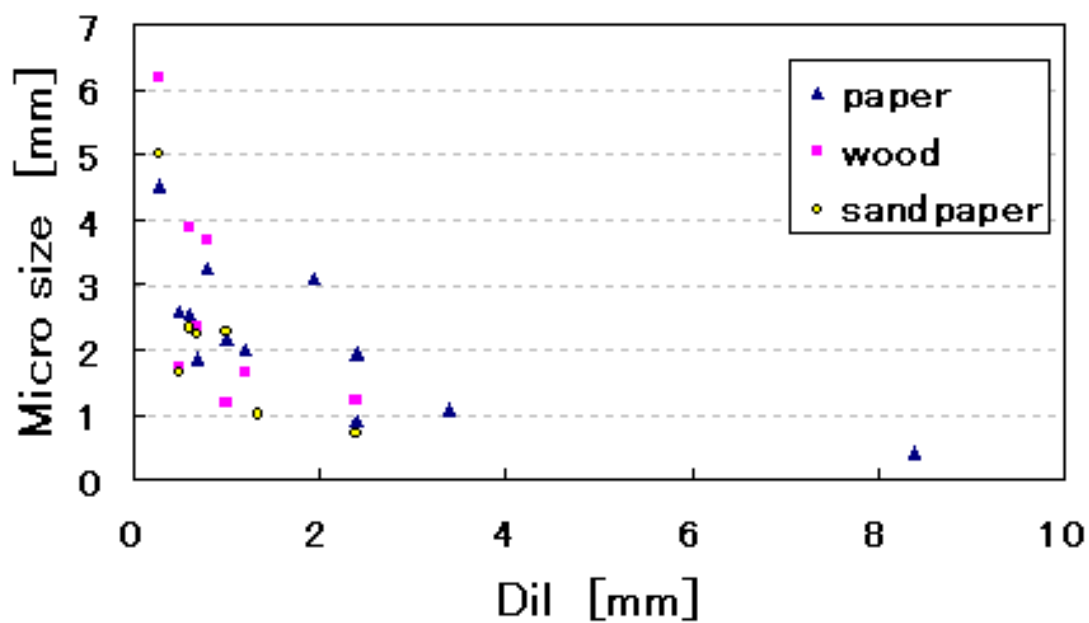


図 4.8: ミクロサイズの散乱物体依存性



## 4.4 低い空間周波数成分の評価

### 4.4.1 スペックルパターンの空間周波数スペクトル

スペックルパターンの空間周波数スペクトルを用いて、マクロサイズを評価する。図 4.9、4.10、4.11 に、各散乱物体からのスペックルパターンを離散フーリエ変換して得られた空間周波数スペクトルを示す。図 4.9(a) では、 $k_x = 3[1/mm]$  以上ではスペクトルは現れないのに対して、照射直径の増加により高周波成分が生じ、(f) では、 $k_x = 5[1/mm]$  以上まで強いスペクトルが現れている。図 4.10、4.11 についても同様である。

図 4.9(b) の  $k_x = 0.5[1/mm]$  及び (c) の  $k_x = 0.8[1/mm]$  において、強いスペクトルが現れている。それぞれの周波数に対応して、照射領域における 0.1mm 及び 0.16mm の距離を隔てた散乱要素間での干渉が特に強く生じていることを示している。同じ散乱物体でも強いスペクトルが生じる場合と生じない場合があり、またその周波数にも違いがあるが、これは物体の表面形状が照射位置によってばらついているためである。図 4.10 及び図 4.11 においても同様に、特に強いスペクトルが生じる場合がある。

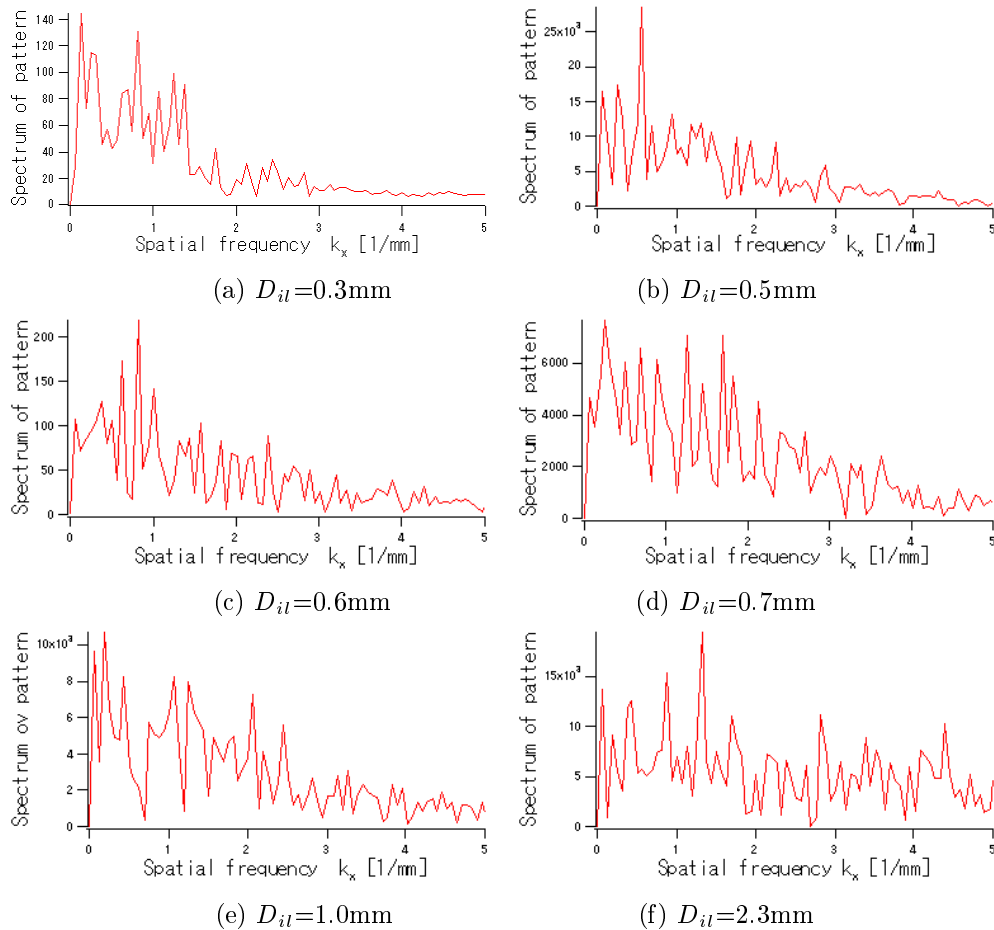


図 4.9: スペックルパターンの空間周波数スペクトル (紙)

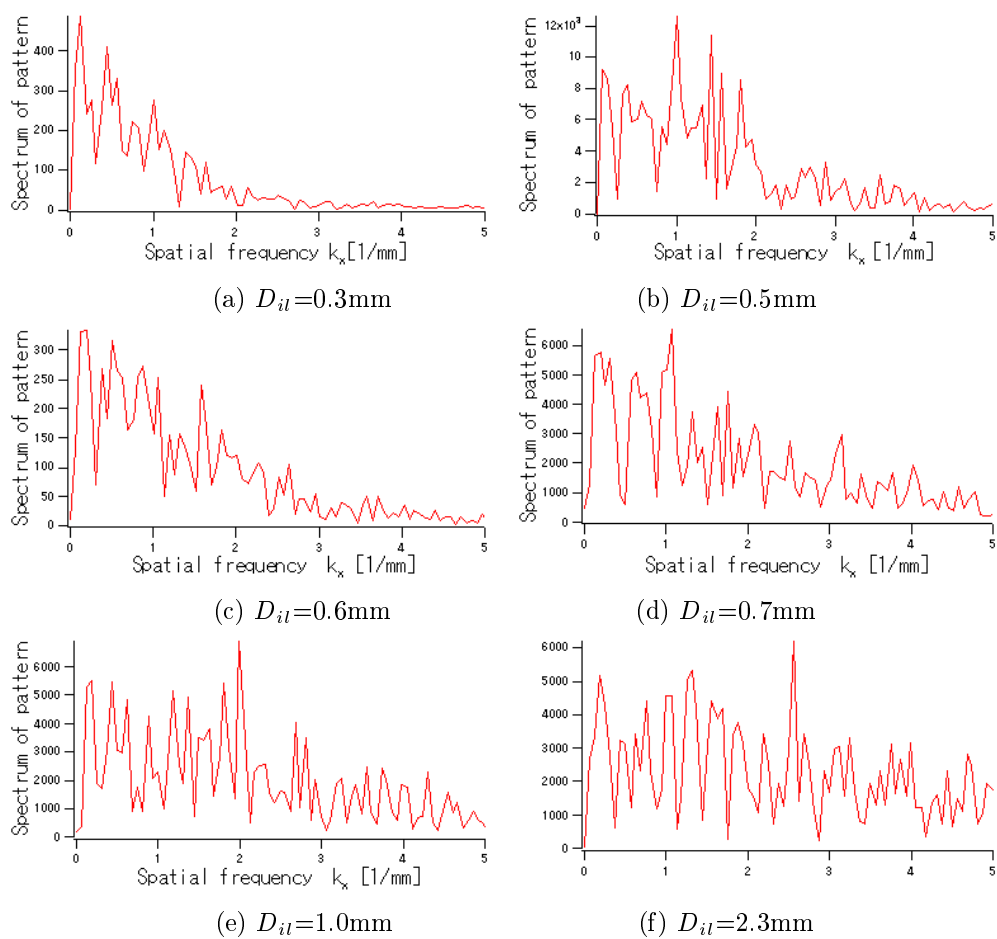


図 4.10: スペックルパターンの空間周波数スペクトル (木板)

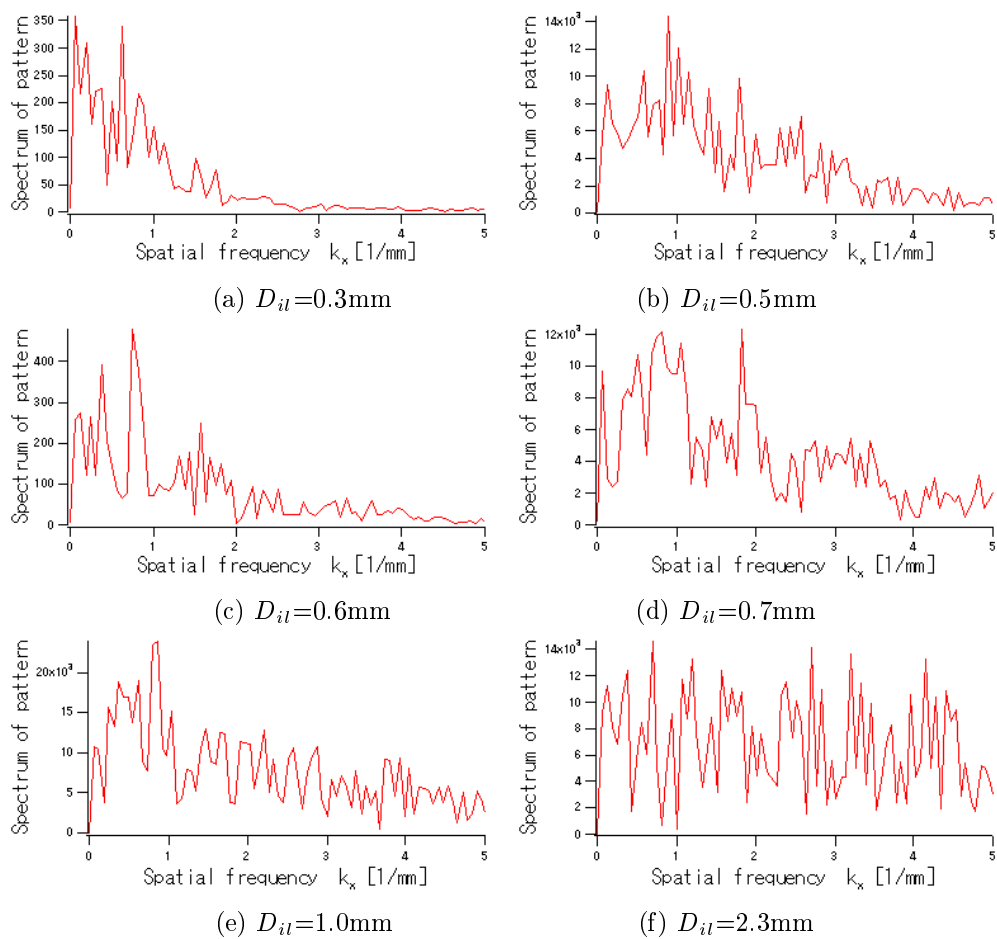


図 4.11: スペックルパターンの空間周波数スペクトル (紙やすり)

#### 4.4.2 空間周波数スペクトルを用いたマクロサイズの評価

図 4.10(b) において、低周波数の  $k_x=0.13\text{mm}$  に強いピークが現れているが、この成分はパターン内の  $5\text{cm}$  の周期に対応しており、マクロサイズが顕著に現れていることを示している。一方、高周波において  $k_x=1.8\text{ [1/mm]}$  に強いピークが現れている。この成分はパターン内の  $3.5\text{mm}$  の周期に対応しており、ミクロサイズに対応した空間周波数成分である。

空間周波数  $k_x = 0.1\sim 0.3\text{ [1/mm]}$  程度がパターンにおける数  $\text{cm}$  の周期に対応する。すなわち、各周波数スペクトルの一番低周波数側のスペクトル成分の大きさが、マクロサイズの現れ方の顕著さを示していると言える。例えば、木板の場合の図 4.10(a) では、 $k_x=0.24\text{ [1/mm]}$  においてマクロサイズに対応した強いスペクトルが現れている。

図 4.12 に、マクロサイズに対応する  $k_x=0.1\sim 0.3\text{ [1/mm]}$  における空間周波数スペクトル成分  $P_m$  の照射直径、散乱物体依存性を示す。 $k_x = 0.6\text{mm}$  において、木板の場合は  $P_m=0.09$  であるのに対し、紙及び紙やすりの場合は順に  $P_m=0.04$ 、 $0.07$  である。紙、紙やすりの場合と比べて木板の場合には強いスペクトルが見られ、マクロサイズがより顕著に現れることを示している。特に照射直径が  $1\text{mm}$  より小さい場合に木板の場合のスペクトルが強く、紙及び紙やすりとの差が顕著である。

また、散乱物体に関わらず、照射直径の増加によりスペクトルは減少し、マクロサイズは顕著には見られなくなる。木板の場合のスペクトル成分は、 $D_{il} = 0.3\text{[mm]}$  では  $P_m=0.19$  であるのに対し、照射直径の増加により減少し  $D_{il} = 2.4\text{[mm]}$  では、 $P_m=0.025$  となる。照射領域の拡大により高周波の成分が大きくなり、低周波成分は相対的に小さくなるためである。

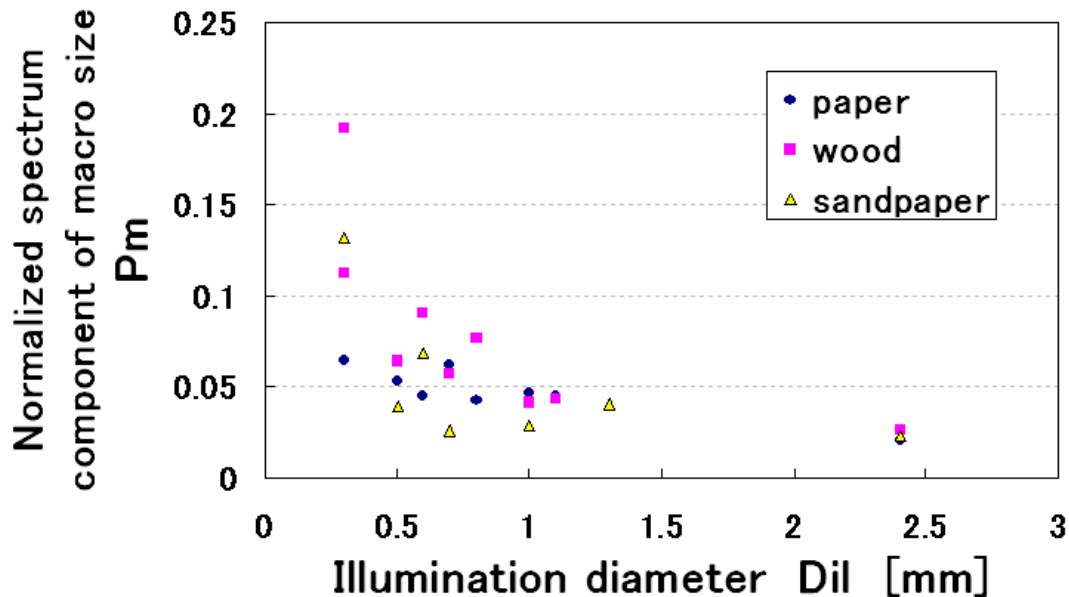


図 4.12: マクロサイズに対応するスペクトル成分の照射直径・散乱物体依存性

図 4.12 において、紙の場合にはスペクトル成分は  $P_m=0.05$  でほぼ一定である。一方、紙やすりの場合は、 $D_{il} = 0.3\text{[mm]}$  では  $P_m=0.13$ 、 $D_{il}=0.5\text{[mm]}$  では  $P_m=0.04$  であり、ばらつきが大きい。紙の場合には、表面がある程度整えられており、どの部分に照射しても一定の特性のパターン

が現れる。一方、紙やすりは表面が粗く、強い散乱を生じる散乱因子が表面にランダムに散らばっている。照射領域内の当該因子の距離に対応してパターンに強い空間周波数が現れるため、紙やすりの場合では照射位置や面積によってスペクトルのばらつきが大きくなる。

#### 4.4.3 マクロサイズを基にした散乱表面のモデル化

前節で明らかとされた通り、木板からのスペックルパターンには数 cm 程度の大きな周期が現れる。木板の表面に存在する周期性が、このマクロサイズの原因だと推測される。木板は繊維により構成されており、それに基づいた周期性が表面に存在すると考えられる。

図 4.13 に、散乱表面が持つ周期性のアレイアンテナによるモデル化を示す。等間隔  $d$  で並んだ散乱素子により構成されており、照射直  $D_{il}$  の内に  $D_{il}/d$  個の散乱素子が存在する。シュミレーションを容易とするためアンテナは 1 次元とし、また各散乱素子からの放射は一樣かつ同位相とする。

アレイアンテナモデルに基づいたスペックルパターンのシュミレーション結果を図 4.14 に示す。 $(d = 50\lambda, D_{il} = 0.8\text{mm}, R_{ob} = 1\text{m})$  として計算している。) ミクロサイズとマクロサイズの両者が見られ、ミクロサイズは  $\lambda R_{ob}/D_{il}$ 、マクロサイズは  $\lambda R_{ob}/d$  と算出される。すなわち、ミクロサイズは照射直径  $D_{il}$  に依存し、マクロサイズは散乱表面の微細な周期  $d$  に依存する。これは、ミクロサイズは照射直径に反比例、マクロサイズは照射直径に依存しないという実験結果と一致する。

図 4.14 と、それに対応する照射直径 0.8mm の場合の実験結果である図 4.2(e) を比較すると、ミクロサイズ、マクロサイズの両者に関して、ある程度的一致が見られる。ただし実際には散乱素子は完全には周期的ではなく、また放射される位相のばらつきも生じるため、シュミレーション結果にランダムなパターンを加えた特性となっている。

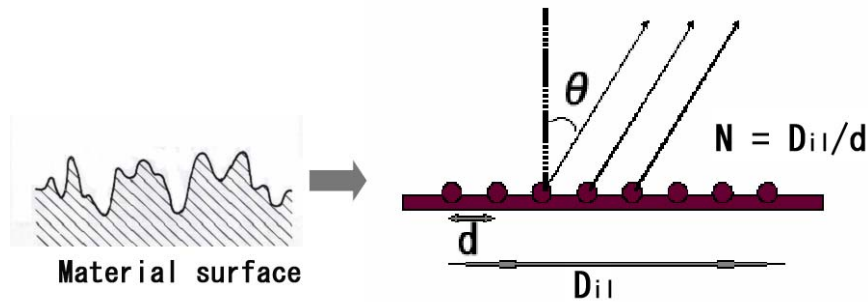


図 4.13: 散乱表面のアレイアンテナによるモデル化

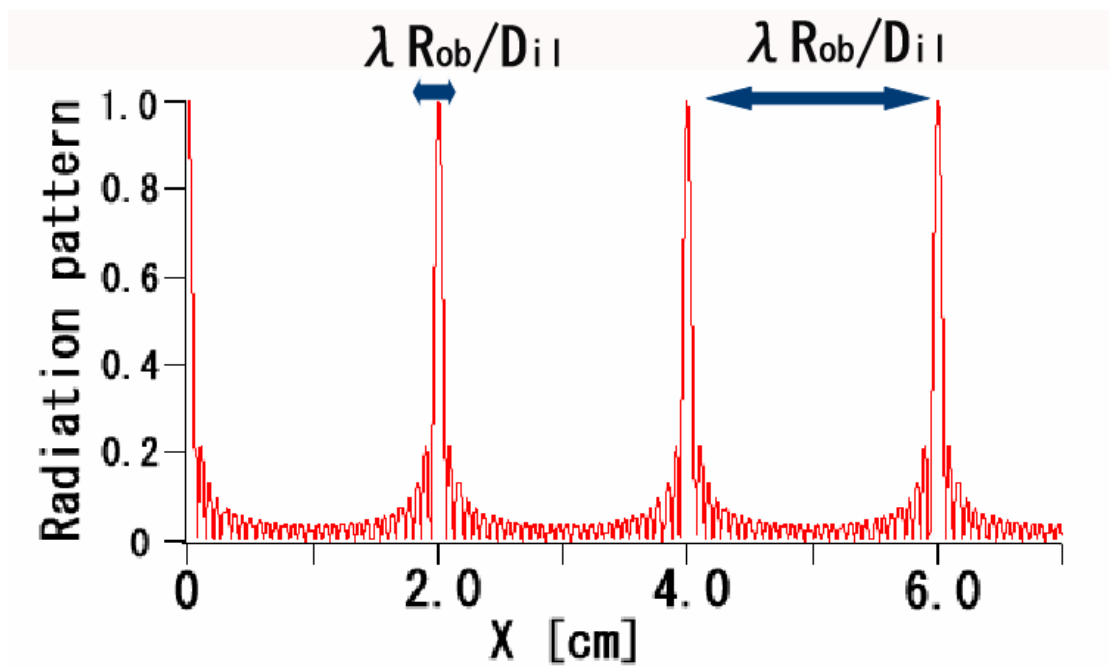


図 4.14: アレイアンテナモデルに基づくスペックルパターンのシュミレーション結果

## 第5章 受信電力変動の受信開口依存性

スペックルパターンによる受信電力変動を抑制するには、受信開口を拡大しパターンを平均化するのが有効である。本章では、スペックル現象による受信電力変動の受信開口依存性、及びその照射直径、散乱物体依存性を明らかにする。

### 5.1 受信電力変動の受信開口、及び照射直径依存性

照射直径  $D_{il} = 0.3\text{mm}$  において受信開口を変えた時のスペックルパターンを図 5.1 に示す。また、同様に  $D_{il}=0.8\text{mm}$  及び  $D_{il}=2.3\text{mm}$  の場合のパターンを図 5.2、図 5.3 に示す。図 5.1(a) では受信電力が  $0.018\text{mV} \sim 0.108\text{mV}$  で極めて大きく変動するのに対し、受信開口の拡大により変動が小さくなり、図 5.1(d) では受信電力の変動は  $1.5\text{mV} \sim 3\text{mV}$  に抑えられる。また、図 5.1(d)、図 5.2(b)、図 5.3(b) を比較すると、照射直径が大きいほど変動が小さくなっている。

受信開口直径を拡大することで、パターンの平均化が生じ受信電力変動が小さくなる。また、照射直径が大きくなるとパターンの空間周波数が高くなるため、平均化がより大きく生じる。

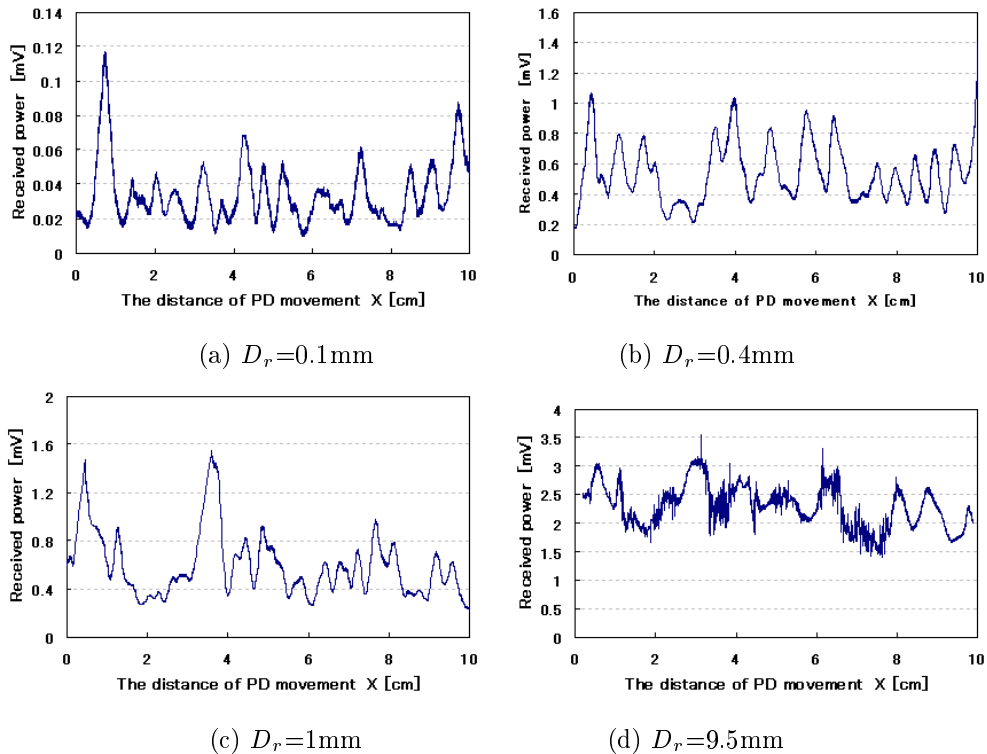
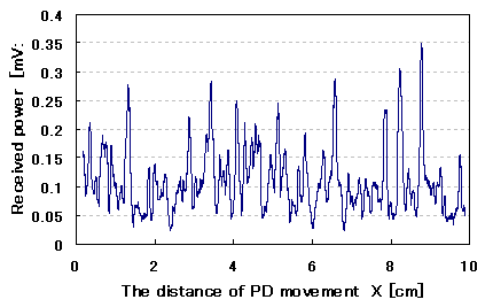
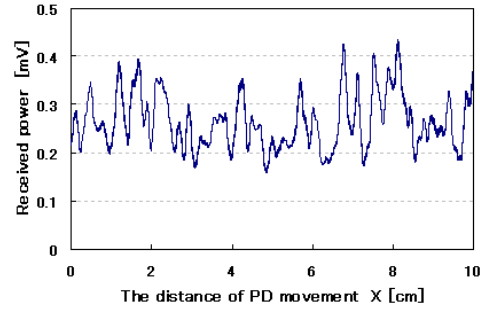


図 5.1: 受信直径拡大によるパターンの平均化 (散乱物体: 紙、照射直径  $D_{il}=0.3\text{mm}$ )

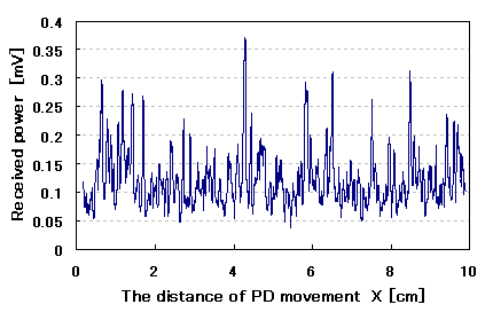


(a)  $D_r=0.1\text{mm}$

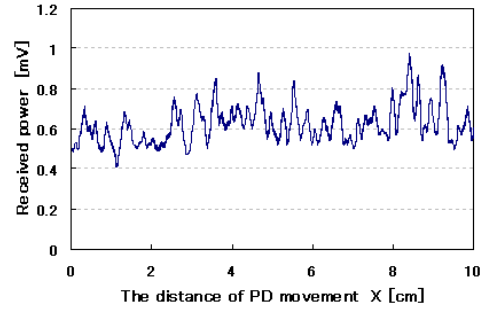


(b)  $D_r=1.0\text{mm}$

図 5.2: 受信直径拡大によるパターンの平均化 (散乱物体: 紙、照射直径  $D_{il}=0.8\text{mm}$ )



(a)  $D_r=0.1\text{mm}$



(b)  $D_r=1.0\text{mm}$

図 5.3: 受信直径拡大によるパターンの平均化 (散乱物体: 紙、照射直径  $D_{il}=2.3\text{mm}$ )

受信電力変動の大きさを、Speckle Contrast (SC) を用いて評価する。SC は以下の式で表される。

$$SC = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2)^{\frac{1}{2}} / \langle I \rangle \quad (5.1)$$

ただし、 $I$  は光強度、 $\langle \rangle$  は平均を表す。変動が大きいほど、SC は大きくなる。

SC の受信開口依存性、及びその照射直径依存性を図 5.4 に示す。照射直径  $D_{il}$  に反比例してパターンのマイクロサイズが変化するため、照射直径に応じて異なる特性となる。 $D_{il}=0.3\text{mm}$ 、及び  $D_{il}=0.6\text{mm}$  と照射直径が小さい場合には、 $SC=0.48$  程度で平坦な部分が現れる。開口直径がマイクロサイズに比べて十分小さい場合は平均化は生じないため、SC は一定となるのである。

図 5.4 の  $D_{il}=0.3\text{mm}$  の場合において、 $D_r=9.5\text{mm}$  で SC は 0.15 まで減少する。一方、図 4.7 より  $D_{il}=0.3\text{mm}$  の場合のマイクロサイズは  $4.5\text{mm}$  である。すなわち、受信開口直径をマイクロサイズの 2 倍程度にすれば、SC は最大値の 30% 以下となる。



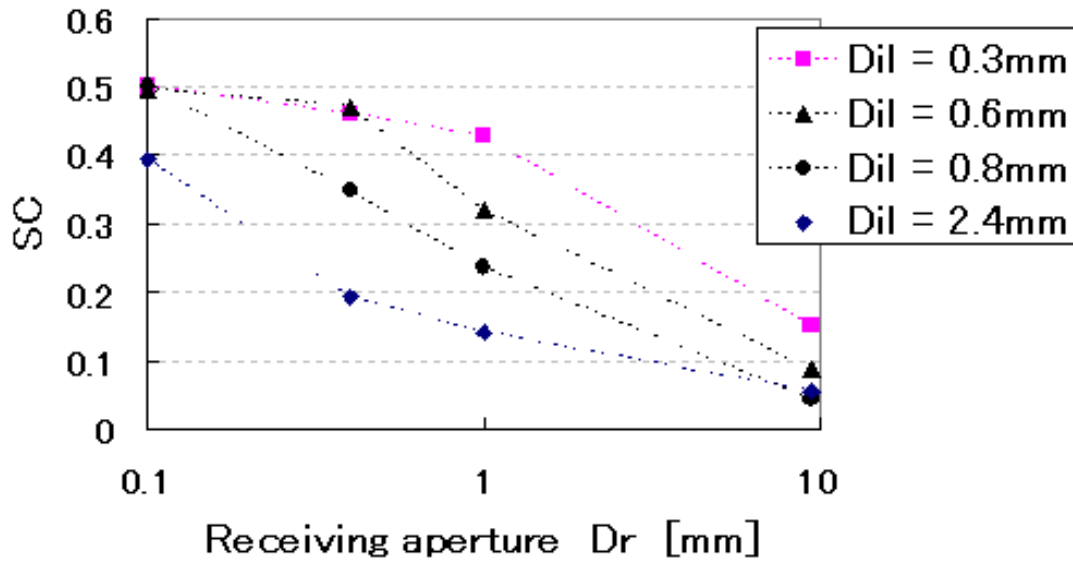


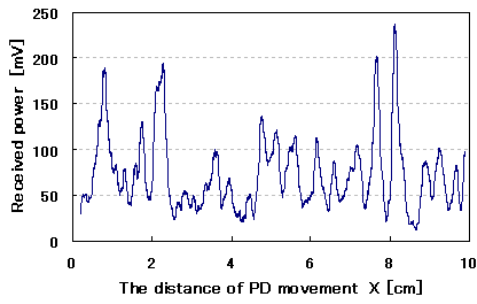
図 5.4: SC の受信開口及び照射直径依存性

## 5.2 受信電力変動の受信開口、及び散乱物体依存性

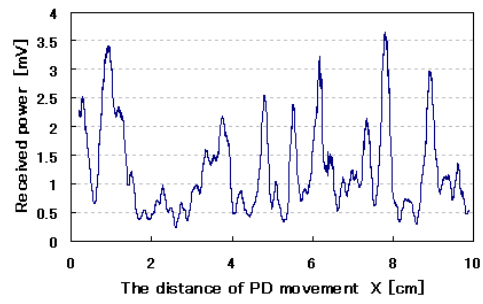
散乱物体を木板、紙やすりに変えてスペックルパターンの受信開口依存性を測定する。測定されたパターンを図 5.5、5.6 に示す。紙の場合と同様に、受信開口の拡大により受信電力変動が小さくなる。一方、図 5.1(d)、図 5.5(d)、図 5.6(d) を比較すると、木板の場合はより大きな周期が現れている。

受信開口拡大による SC 減少特性の散乱物体依存性を図 5.7 に示す。受信直径  $D_r$  が 0.1mm と小さい場合には、SC は散乱物体の表面粗さに対応した固有の値をとっている。受信直径が 0.4mm 以上となるとパターンの平均化が生じ、 $D_r = 1mm$  で SC はほぼ同レベルとなる。受信直径が 9.5mm においては、紙と紙やすりは  $SC = 0.15$  程度まで減少するのに対して木板は  $SC = 0.22$  までしか SC が減少しない。

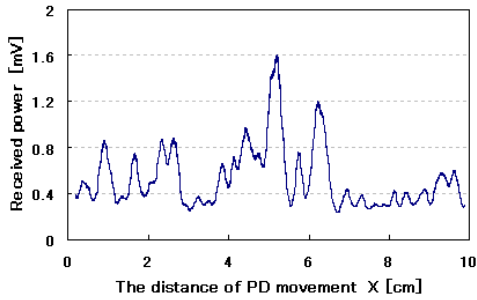
受信直径の 1mm から 9.5mm への拡大によりマイクロサイズは完全に平均化されてしまう。しかし、木板の場合には数 cm のマクロサイズが顕著に存在するため受信直径 9.5mm ではこれを十分平均化できず、紙や紙やすりの場合に比べて SC が高いレベルとなっている。



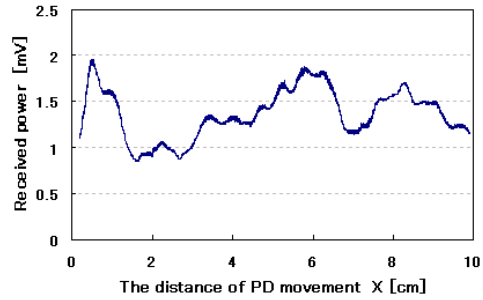
(a)  $D_r=0.1\text{mm}$



(b)  $D_r=0.4\text{mm}$

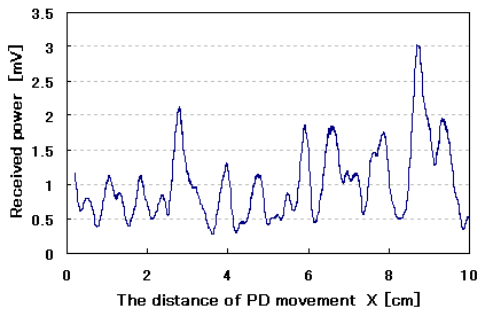


(a)  $D_r=1\text{mm}$

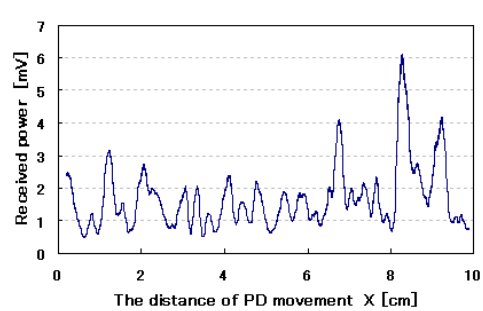


(b)  $D_r=9.5\text{mm}$

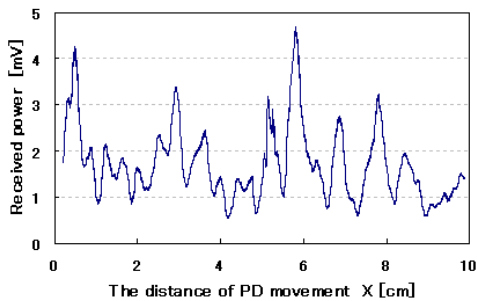
図 5.5: 受信直径拡大によるパターンの平均化 (散乱物体: 木板、照射直径  $D_{il}=0.3\text{mm}$ )



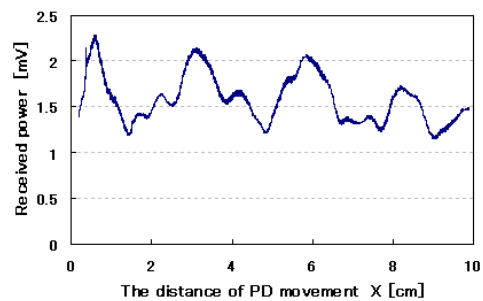
(a)  $D_r=0.1\text{mm}$



(b)  $D_r=0.4\text{mm}$



(a)  $D_r=1\text{mm}$



(b)  $D_r=9.5\text{mm}$

図 5.6: 受信直径拡大によるパターンの平均化 (散乱物体: 紙やすり、照射直径  $D_{il}=0.3\text{mm}$ )

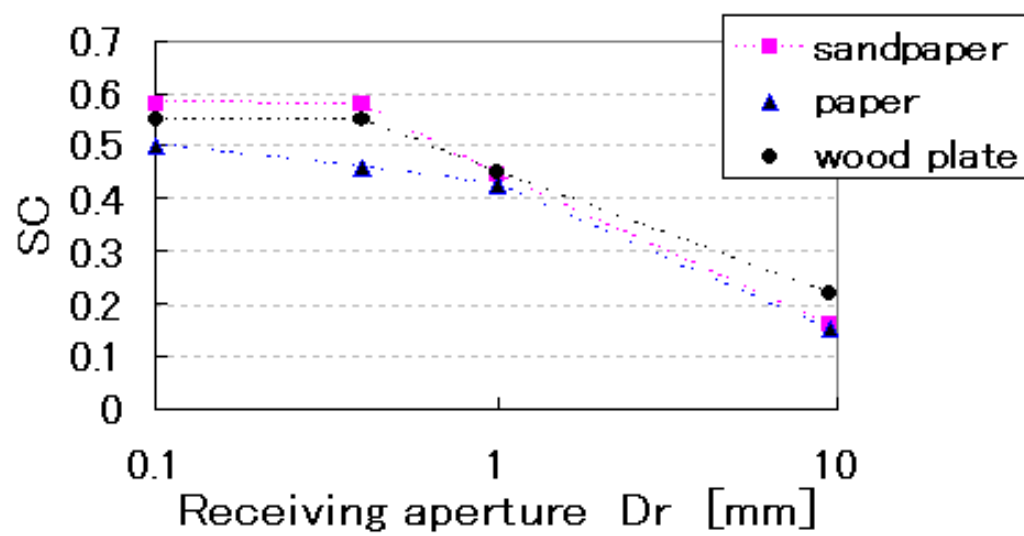


図 5.7: 受信開口拡大による SC 減少特性の散乱物体依存性

## 第6章 散乱物体上の照射位置変位による受信電力変動

本章では、散乱物体上の照射位置が変位した時のスペックルパターン変化及び受信電力への影響について評価する。

### 6.1 照射位置変位による受信電力変動の統計的評価

#### 6.1.1 受信電力変動の評価

図 3.1 においてターゲットを微動台に載せ、その位置を手動で変えつつ、照射位置変位による受信電力変化を測定した。その例を図 6.1 に示す。同じ変位  $\Delta X_s = 0.05\text{mm}$  について、複数回測定を行っている。9[s] の間に、照射位置を 0.5mm 変位させている。ただし、時間と変位の比例関係は無い。測定 1 では、受信電力が、当初 ( $t=0[\text{s}]$ ) の 2.2mV から、変位中に変化し 2.4mV になるが、最終的 ( $t=9[\text{s}]$ ) には 1.6V となる。照射位置の変位により、スペックルパターンが変化し受信機の位置の光強度が変動するためである。

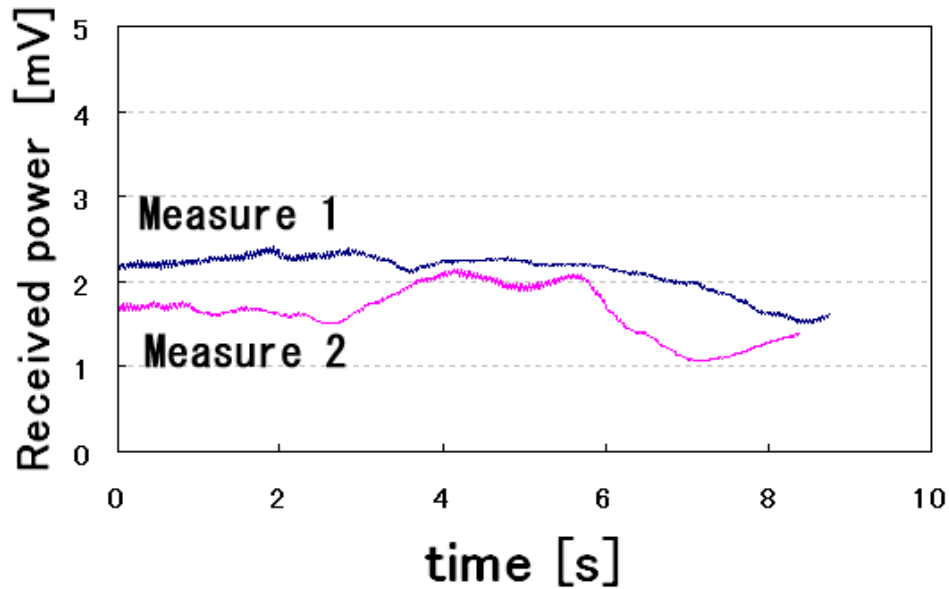


図 6.1: ターゲットの変位による受信電力変動の 2 例 ( $\Delta X_s = 0.05\text{mm}$ ,  $D_{il} = 0.6\text{mm}$ )

この変動の大きさはかなり変動する。例えば測定 2 においては当初の 1.7mV から、変位中に

2.1mV まで増加し、その後 1.07mV まで減少しており、より大きな変動が生じている。しかし、変動の様子に統一性もあるので、統計的に理解することを試みる。まず測定毎に受信電力の最大値と最小値の差  $P_f$  で評価する。測定 1 の場合、 $P_f=0.8\text{mV}$  である。次に、複数回の測定結果から、 $\Delta X_s$  に対する  $P$  の平均値  $\{P_f\}_{ave}$  を求める。すなわち、 $\{P_f\}_{ave}$  は変位  $X_s$  に対する受信電力変動量の期待値である。

なお、変動のばらつきの原因は 2 つある。1 つ目は変位前のパターンにおける受信機の位置のばらつきである。変位前に受信機がパターンの鋭いピークの上にある場合には変位に対する変動は大きくなり、一方、パターンの平均レベルにある場合には変動は小さくなる。2 つ目は、散乱表面のばらつきである。パターン形成に大きく寄与する部分が照射領域に入る、あるいは照射領域から抜ける場合は、パターンが大きく変動する。

### 6.1.2 受信電力変動の照射位置変位 $\Delta X_s$ 依存性の評価

変位  $\Delta X_s$  を変えて、同様の測定を行う。図 6.2 に、異なる変位  $\Delta X_s$  について受信電力変化の例を示す。 $\Delta X_s=0.1\text{mm}$  では、 $P_f$  は 1[mV] 程度であり、変化も単調である。変位の増加により受信電力変動も大きくなり、 $\Delta X_s=0.2\text{mm}$  においては明点、暗点と変動が 1 周期分生じる。さらに変位を増加すると、 $\Delta X_s=0.5\text{mm}$  及び  $\Delta X_s=1.0\text{mm}$  では明点、暗点が繰り返して生じる。

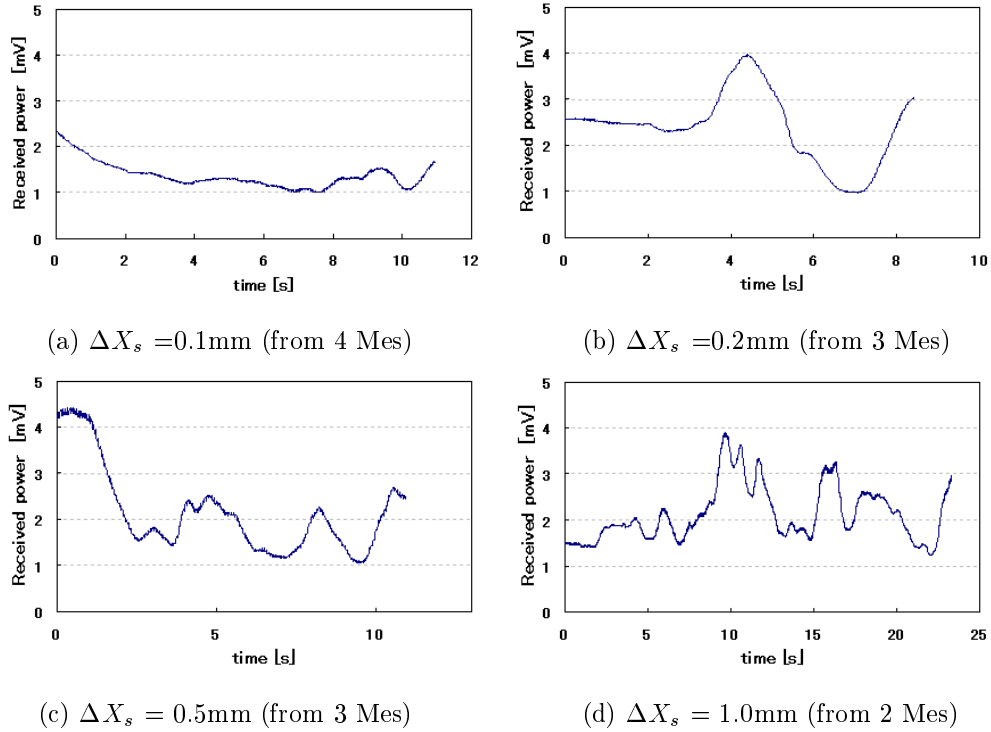


図 6.2: ターゲットの変位による受信電力の変動の例 ( $D_{it}=0.6\text{mm}$ )、Mes:Measurement

$\{P_f\}_{ave}$  の変位  $\Delta X_s$  依存性を図 6.3 に示す。エラーバーは、複数回の測定における  $P_f$  のばらつきを示している。 $\{P_f\}_{ave}$  は、 $\Delta X_s=0.3\text{mm}$  程度より右で 3mV 程度の値に飽和する特性が見られる。これは、平均的に  $\Delta X_s = 0.3\text{mm}$  の変位でパターンの明点と暗点が反転することを示してい

る。さらに大きな変位では、図 6.2(c) 及び (d) のように暗点、明点が繰り返されるのみで、最大値と最小値の差は増加しないため  $\{P_f\}_{ave}$  は飽和する。

$\{P_f\}_{ave}$  が飽和する時の変位  $\Delta X_s$  を  $\Delta X_{sat}$  と定義する。すなわち、 $\Delta X_{sat}$  はスペックルパターンの暗点、明点を反転させるために必要な照射位置変位の期待値である。

図 6.4 に、前節及び本節における統計処理のフローチャートを示す。まず一定の照射位置変位  $\Delta X_s$  に対する受信電力変動  $P_f$  の測定を繰り返し行い、 $P_f$  の平均  $\{P_f\}_{ave}$  を求める。次に、 $\Delta X_s$  を変えて同じ測定を繰り返し、 $\Delta X_s$  に対する  $\{P_f\}_{ave}$  のグラフを得る。そして、 $\Delta X_s$  vs  $\{P_f\}_{ave}$  のグラフの飽和特性から、 $\Delta X_{sat}$  を読み取る。

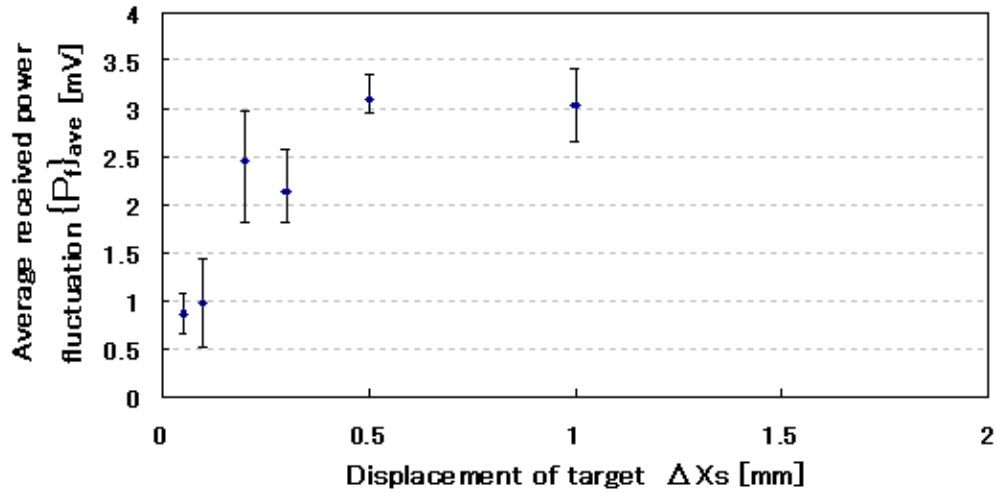


図 6.3:  $\{P_f\}_{ave}$  の変位  $X_s$  依存性 ( $D_{il}=0.6\text{mm}$ )

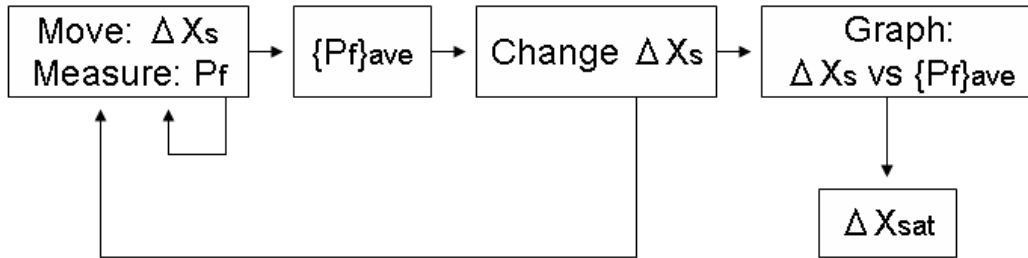


図 6.4:  $\Delta X_{sat}$  算出のフローチャート

## 6.2 照射位置変位による受信電力変動の照射直径依存性

### 6.2.1 $\Delta X_{sat}$ の照射直径依存性

前節の測定とデータ処理を、照射直径を変えつつ行った。図 6.5 に、照射直径  $D_{il}=4.8\text{mm}$  の場合の照射位置変位に対する受信電力変化の例を示す。図 6.2 の場合と異なり、 $\delta X_s=0.2\text{mm}$  の変位では変動は小さく  $P_f=0.11\text{mV}$  である。 $\delta X_s=0.7\text{mm}$  で明点から暗点への変動が生じ、 $P_f=0.2\text{mV}$  となり、さらに変位を増加すると、(c) 及び (d) に見られるように、暗点、明点が交互に繰り返される。図 6.2(d) の場合と比べて、図 6.5(d) ではより周期的に明点、暗点が現れている。

異なる照射直径に対する  $\{P_f\}_{ave}$  の変位  $\Delta X_s$  依存性を図 6.6、6.7 に示す。なお、本来は前節のように各  $\Delta X_s$  について複数回測定を行い  $P_f$  の平均をとるのが好ましいが、エラーバーがない点に関しては、実験の便益上、1 回の測定しか行わなかった。その代わりに、前節よりも多くの  $\Delta X_s$  について測定することで補っている。

どの場合においても、図 6.3 の場合と同様に、照射位置変位の増加により  $\{P_f\}_{ave}$  は増加、及び飽和する特性がある。一方、 $\Delta X_{sat}$  は照射直径に依存している。図 6.6(a) においては  $\Delta X_s=0.3[\text{mm}]$  程度で飽和するのに対し、図 6.7(b) では、 $\Delta X_s=0.8[\text{mm}]$  程度で飽和している。また、図 6.7(d) の場合には、 $\Delta X_s=0.05[\text{mm}]$  で、既に飽和している。

得られた  $\Delta X_{sat}$  の照射直径依存性を図 6.8 に示す。照射直径の増加とともに  $\Delta X_{sat}$  は増加し、 $D_{il} = 5\text{mm}$  程度でピークとなり、さらに  $D_{il}$  を増加させると  $\Delta X_{sat}$  は減少する。

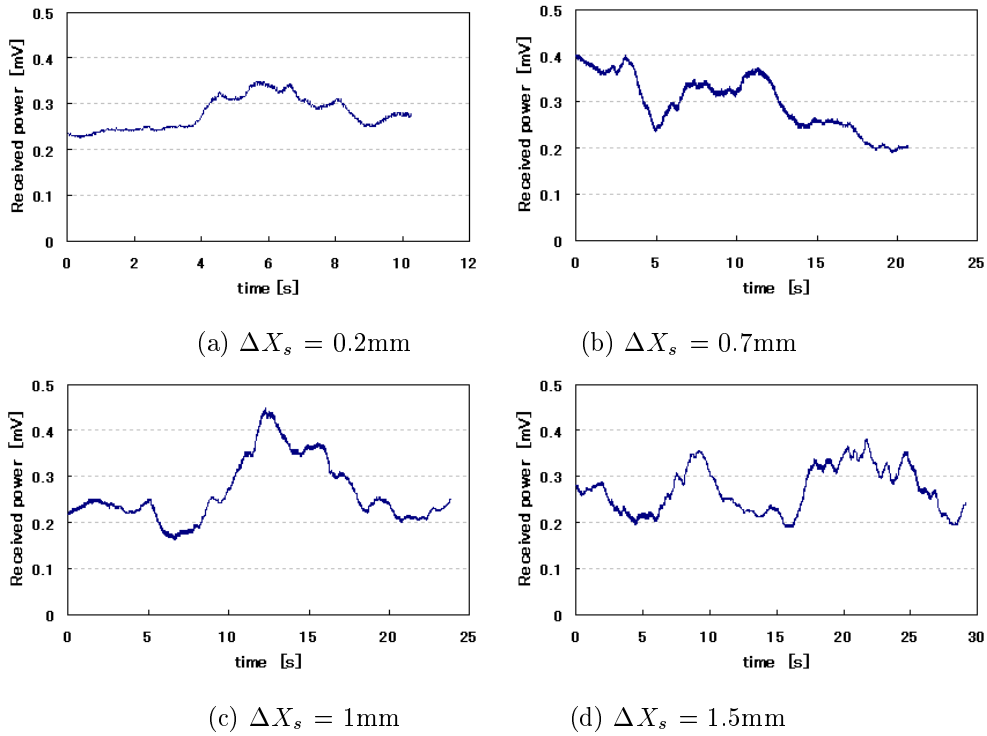
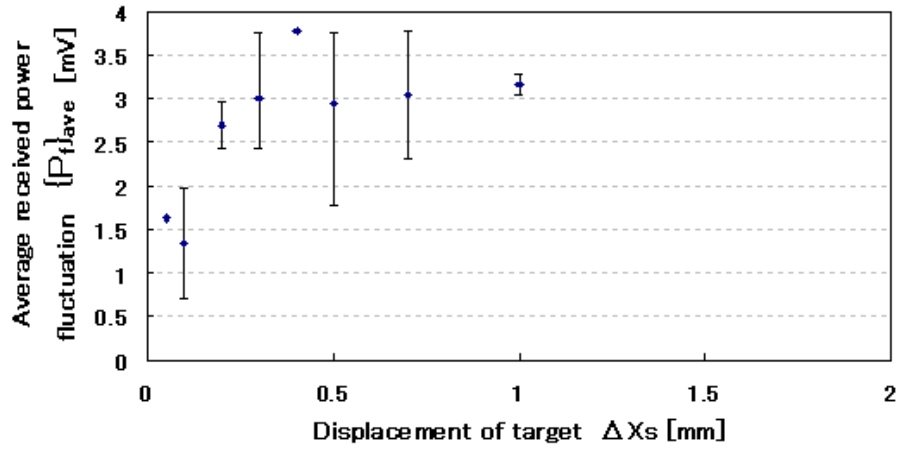
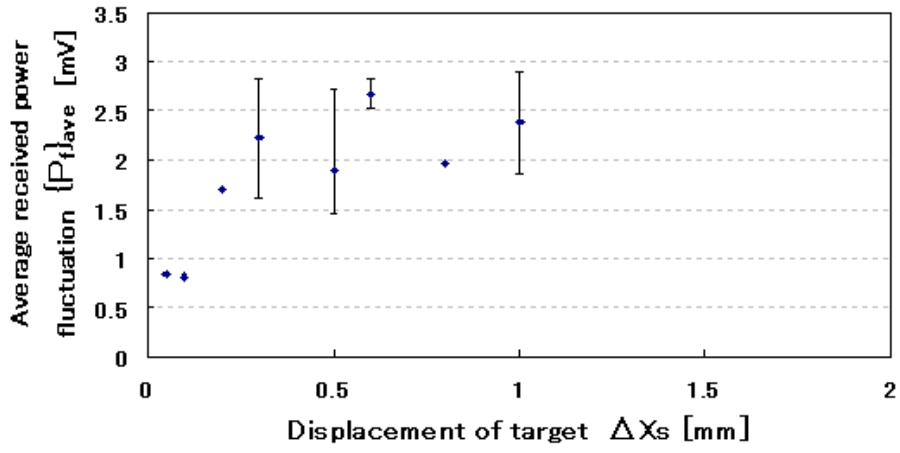


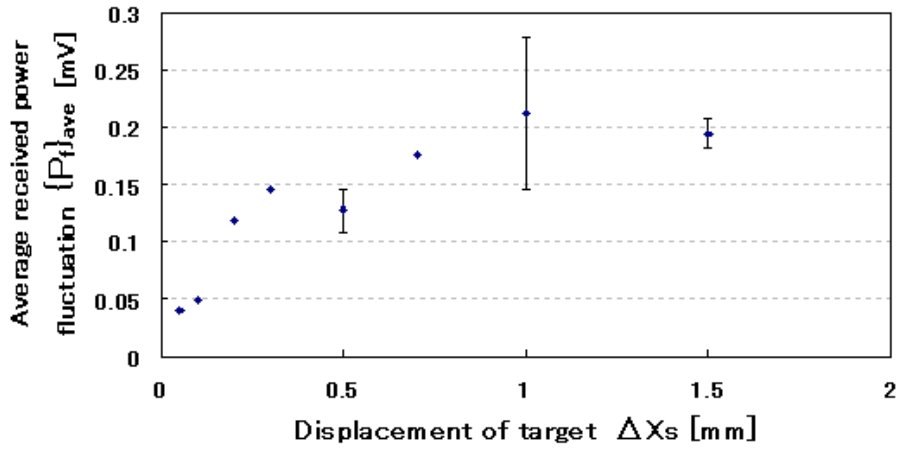
図 6.5: ターゲットの変位による受信電力の変動の例 ( $D_{il}=4.8\text{mm}$ )



(a)  $D_{il}=1.2\text{mm}$



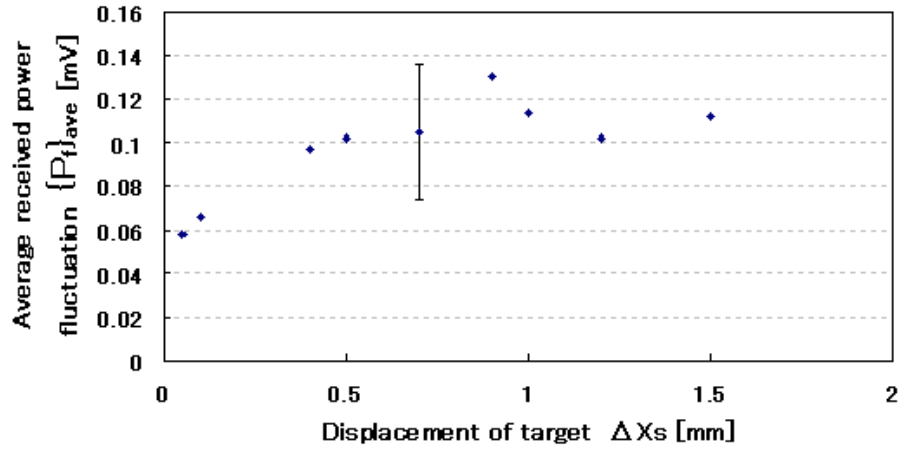
(b)  $D_{il}=2.4\text{mm}$



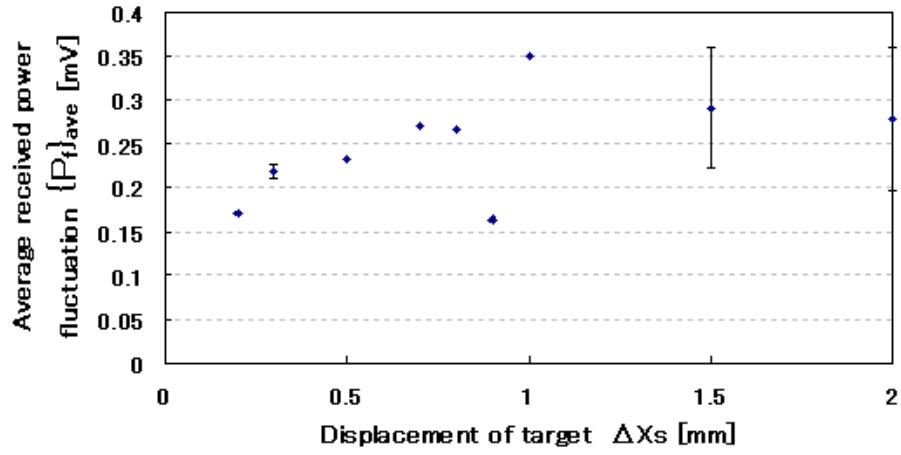
(c)  $D_{il}=4.8\text{mm}$

図 6.6: 異なる照射直径に対する  $\{P_f\}_{ave}$  の変位 x 依存性 ( $D_{il}=1.2\text{mm} \sim 4.8\text{mm}$ )

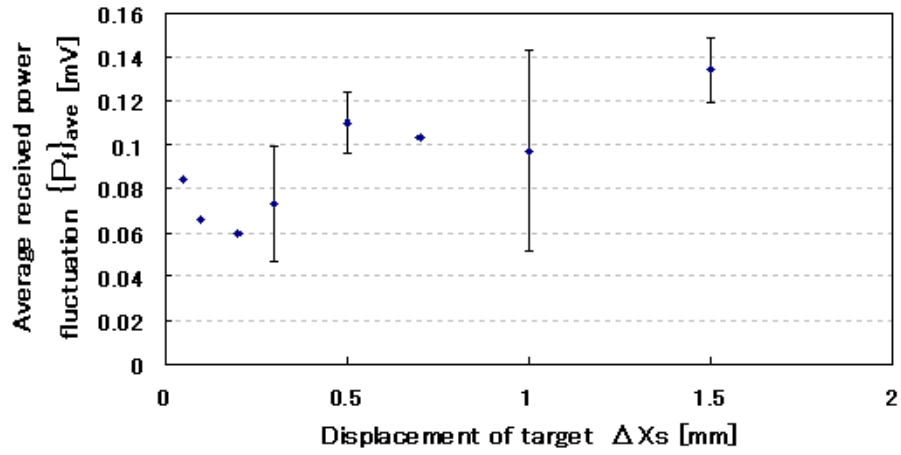




(a)  $D_{il}=7.8\text{mm}$



(b)  $D_{il}=10.8\text{mm}$



(c)  $D_{il}=23\text{mm}$

図 6.7: 異なる照射直径に対する  $\{P_f\}_{ave}$  の変位  $\Delta X_s$  依存性 ( $D_{il}=7.8\text{mm} \sim 23\text{mm}$ )

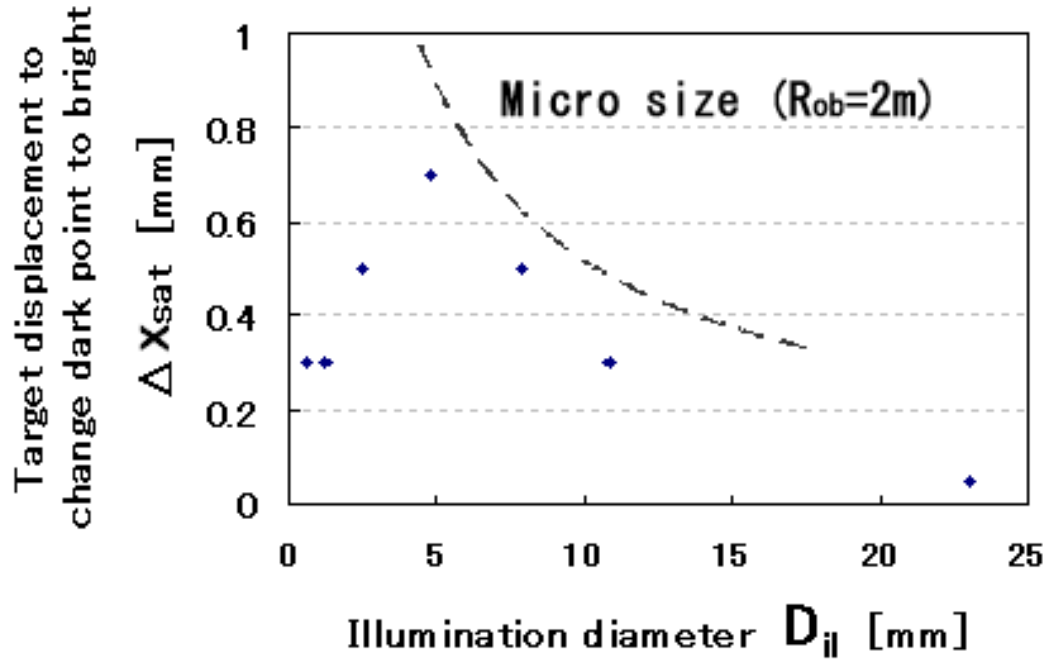


図 6.8:  $\Delta X_{sat}$  の照射直径依存性

### 6.2.2 $\Delta X_{sat}$ の照射直径依存性に対する考察

図 6.8 のカーブは、2 つの異なるメカニズムによってスペックルパターンが変化していることを示している。1 つ目は、パターン形成に寄与するターゲットの散乱部分が照射ビーム内で入れ替わってしまうことによる、パターンそのものの変化である。2 つ目は、スペックルパターンは同じでも、照射位置の変位と同量平行移動してしまうことである。

照射直径が 5mm 以下においては、1 つ目の要素が  $X_{sat}$  特性に大きく影響する。照射面が小さいため、少しターゲットが変位するだけで照射面内における変位前後で共通の散乱部分の割合が小さくなり、全く異なるパターンが現れる。この領域での  $\Delta X_{sat}$  は照射直径の 15% 程度である。

一方、照射直径 5mm 以上においては、2 つ目の要素が  $\Delta X_{sat}$  特性に大きく影響する。照射直径が大きくなるとパターンのマイクロサイズが小さくなり、明点と暗点の間の距離が小さくなる。そのため、少しのスペックルパターンの平行移動により受信機の位置が暗点から明点へと反転する。

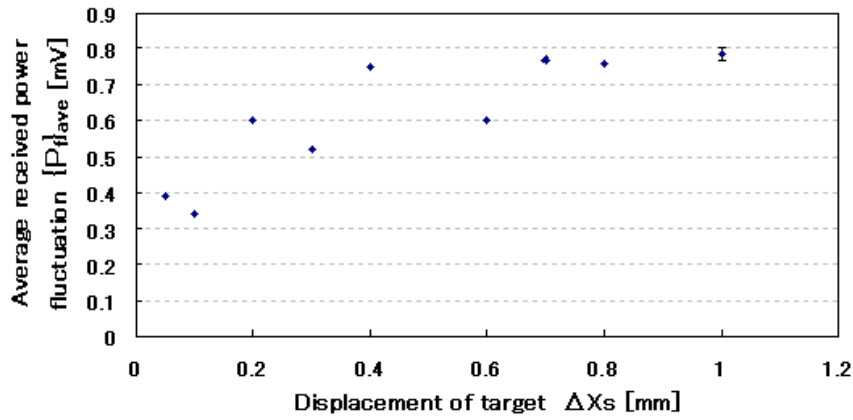
図 6.8 に、 $R_{ob}=2m$  の場合のマイクロサイズの近似曲線を示す。照射直径 5mm 以上では、 $\Delta X_{sat}$  はマイクロサイズにある程度一致する。 $\Delta X_{sat}$  のピークは、照射直径の 15% とマイクロサイズが一致する点において生じる。

### 6.3 照射光の位相曲面が与える影響の検討

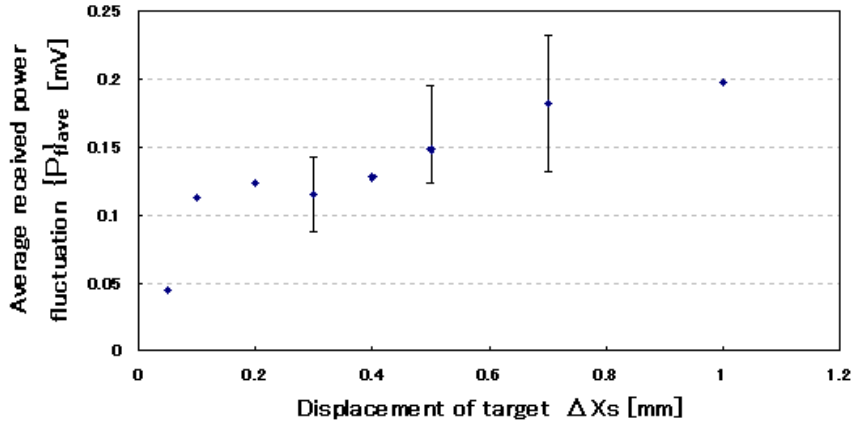
照射位置変位によるスペックルパターンの変化は、照射光の位相曲面の曲率に依存することが明らかとされている。[11] 位相面の曲率は送信ビームの広がり角に対応しており、重要なシステムパラメータである。本節では、照射位置変位による受信電力変動の送信ビーム広がり角依存性について検討する。

前節では、レーザとレンズまでの距離、及びレンズの焦点距離より、ビーム広がり角は 6mrad と算出される。本節では、焦点距離の異なるレンズを用いてビーム広がり角 12mrad、18mrad の場合を測定、また、レンズを用いないことにより、レーザそのものの広がり角 2mrad の場合を測定する。

図 6.9、6.10 に、ビーム広がり角 12mrad における、 $\{P_f\}_{ave}$  の変位  $\Delta X_s$  依存性を示す。また、図 6.11、6.12 に、順に広がり角 2mrad、18mrad の場合の、 $\{P_f\}_{ave}$  の変位  $\Delta X_s$  依存性を示す。

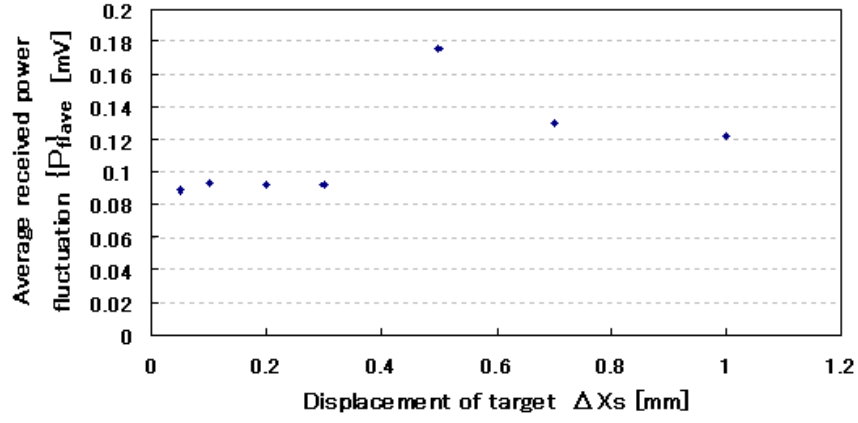


(a)  $D_{il}=1.2\text{mm}$

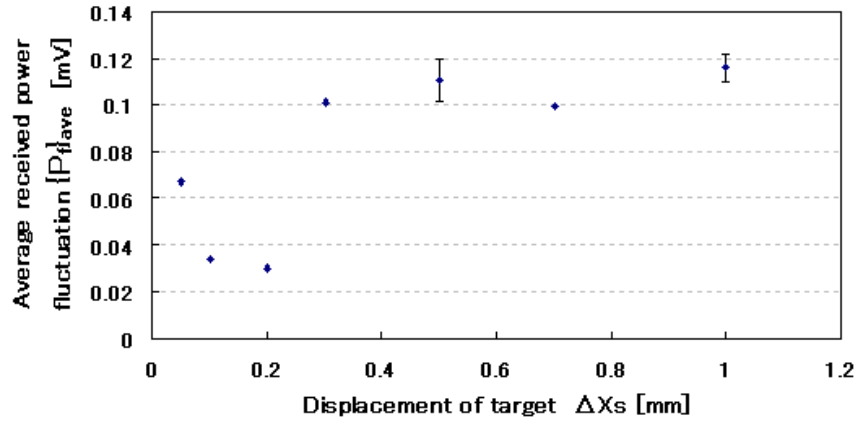


(b)  $D_{il}=6.0\text{mm}$

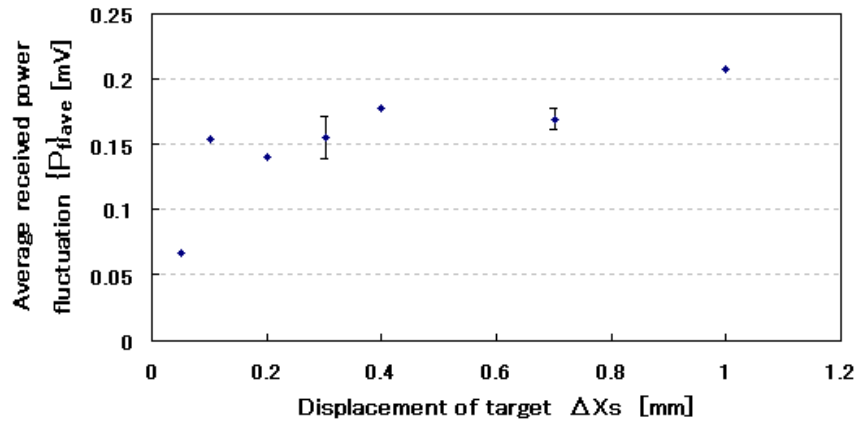
図 6.9: 異なる照射直径に対する  $\{P_f\}_{ave}$  の変位  $\Delta X_s$  依存性 (ビーム広がり角度: 12mrad  $D_{il}=1.2\text{mm}$ , 6.0mm)



(c)  $D_{il}=8.4\text{mm}$

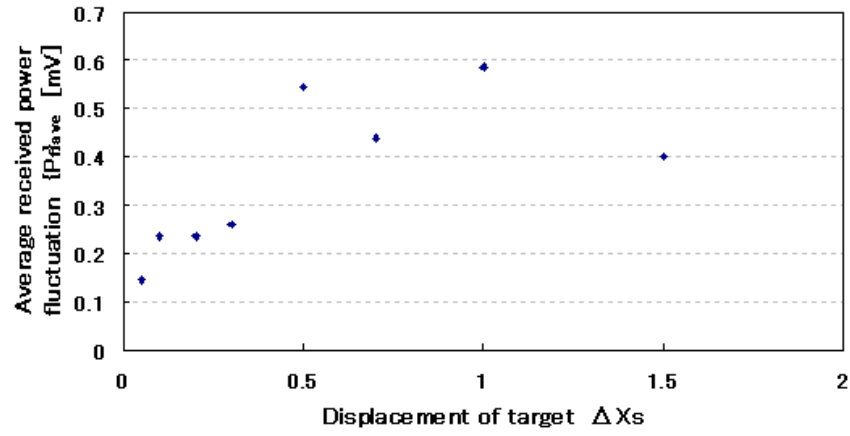


(a)  $D_{il}=10.8\text{mm}$

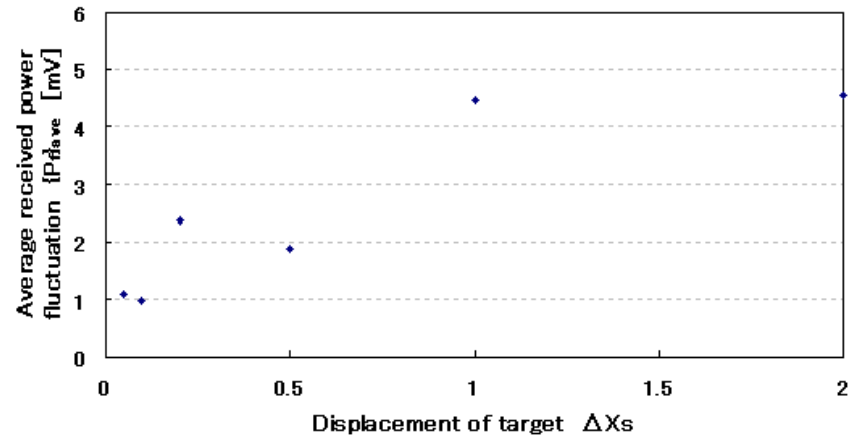


(b)  $D_{il}=13.2\text{mm}$

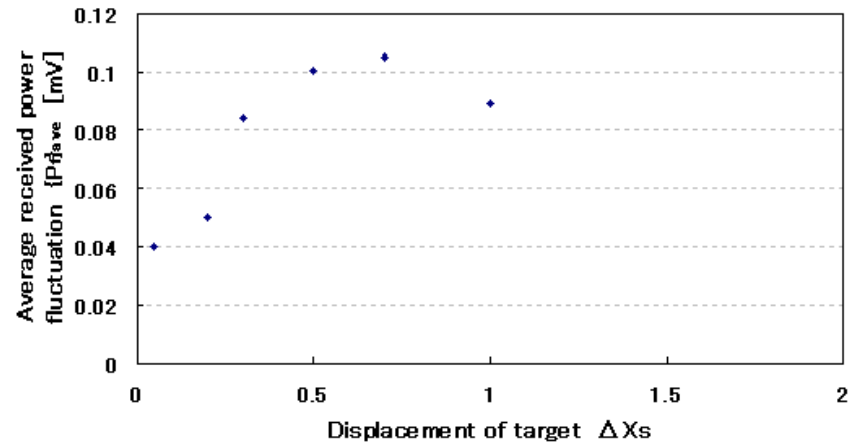
図 6.10: 異なる照射直径に対する  $\{P_f\}_{ave}$  の変位  $\Delta X_s$  依存性 (ビーム広がり角度: 12mrad  $D_{il}=8.4\text{mm} \sim 13.2\text{mm}$ )



(a)  $D_{il}=1.4\text{mm}$



(b)  $D_{il}=2.4\text{mm}$



(c)  $D_{il}=4.4\text{mm}$

図 6.11: 異なる照射直径に対する  $\{P_f\}_{ave}$  の変位  $\Delta X_s$  依存性 (ビーム広がり角度: 2mrad)

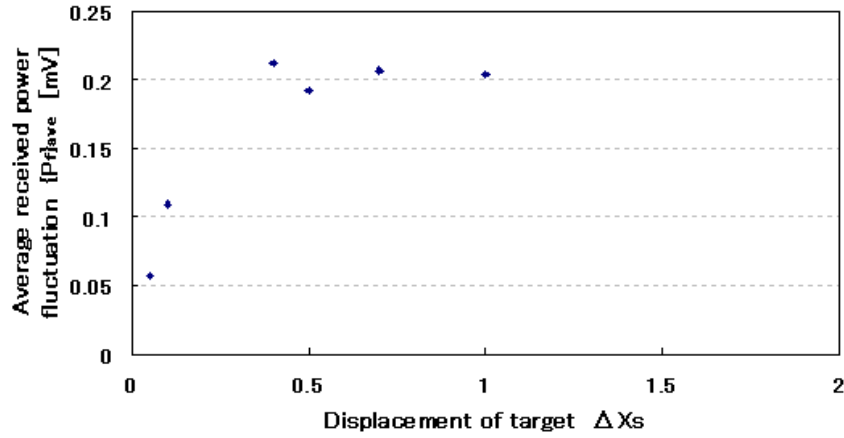


図 6.12:  $\{P_f\}_{ave}$  の変位  $\Delta X_s$  依存性 (ビーム広がり角度: 18mrad、照射直径:  $D_{il}=3.6\text{mm}$ )

図 6.13 に、異なる照射ビーム広がり角における  $\Delta X_{sat}$  の比較を示す。各特性のピークより左側 ( $D_{il}$  が小さい側) においては、広がり角が小さいほど  $\Delta X_{sat}$  は大きくなる特性が見られる。広がり角 2mrad、6mrad、12mrad の場合における  $\Delta X_{sat}$  のピーク値は順に 0.75[mm]、0.7[mm]、0.6[mm] である。また、広がり角 12mrad の場合は、 $D_{il}=3.6\text{mm}$  において  $\Delta X_{sat}=0.4[\text{mm}]$  であり、明らかに他の場合より小さい。

照射ビーム広がり角が大きくなるほど、照射面における位相曲面の勾配が急になるため、照射位置変位による位相変化が大きくなる。そのため、より小さな位置変位によりスペckルパターンが大きく変動する。

一方、ピークより右側 ( $D_{il}$  が大きい側) においては、広がり角に依存せず一様に減少する特性が見られる。マイクロサイズは広がり角に依存しないためである。

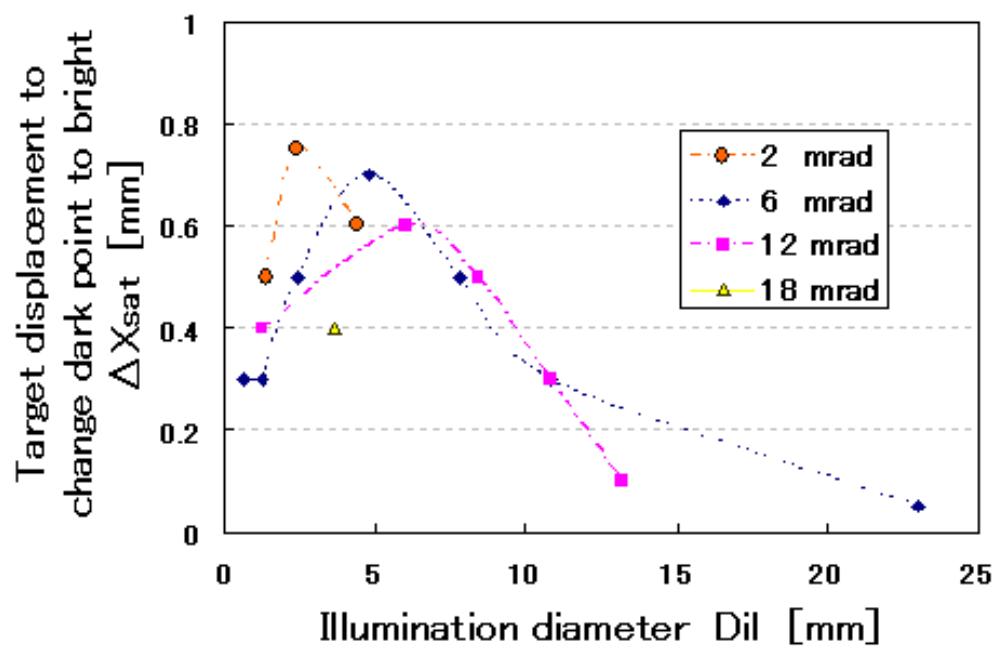


図 6.13: 異なる照射ビーム広がり角における、 $\Delta X_{sat}$  の照射直径依存性の比較

## 第7章 連続パルスレーザを用いる散乱光受信システムへの影響

本節では、パルス型レーザを用いる場合における、スペックル現象による受信電力変動の評価を行う。

### 7.1 実験構成

実験構成を改めて図 7.1 に示す。送信光をアッテネータを用いて 2 つに分け、一方はそのまま送信波形としてフォトダイオードにより受信、もう一方は散乱物体に照射してその散乱光を受信する。受信された送信波形、及び散乱光のパルス波形を、オシロスコープを用いて測定する。

散乱前後の波形を比較する実験においては、フォトダイオードの特性のばらつきの影響を無くすために、同一のフォトダイオードに時間差をつけて送信光、散乱光を入力し、波形を測定する。パルス毎の受信電力評価においては、オシロスコープの統計処理機能を用いて受信波形の積分を行う。レンズを用いて照射直径を変化させ、当該変動の照射直径依存性を明らかにする。

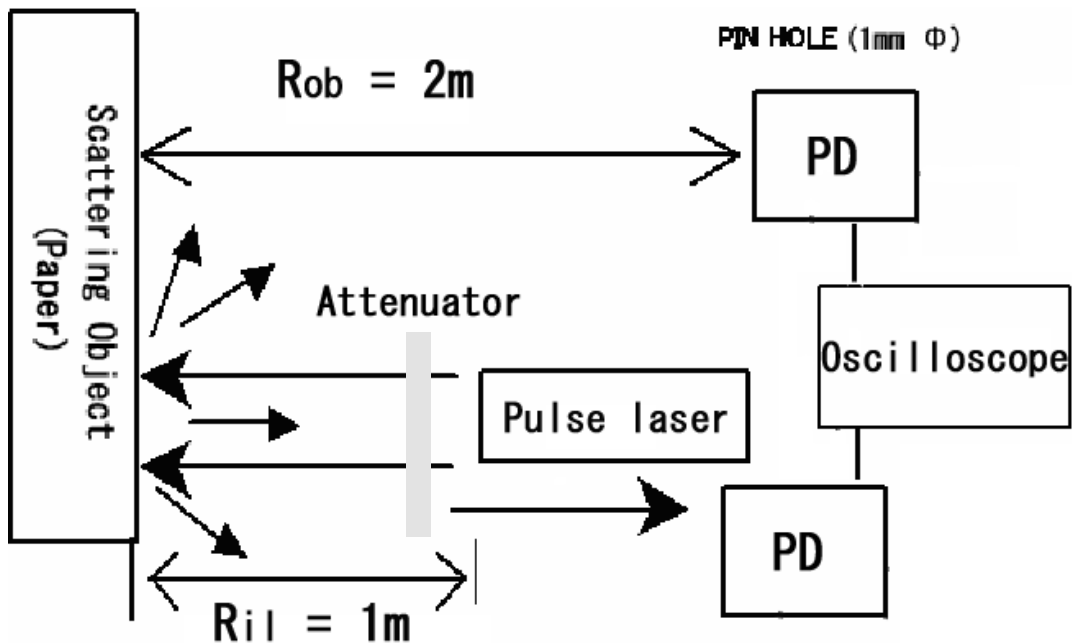


図 7.1: 連続パルスレーザを用いた実験構成



## 7.2 散乱前後の波形比較

送信波形に対する受信波形の測定結果を図 7.2 に示す。各グラフにおいて、先に受信されているものが送信波形、後が受信波形である。パルス幅は  $2\text{ns}$ ~ $2.5\text{ns}$  程度である。

送信・受信間で、波形はほぼ保存されている。 $2\text{ns}$  という極めて短い照射時間内においてはスペックルパターンが変化しないため、パターンの時間的变化による波形の歪は生じない。

一方、送信波形に比した受信波形のパワーレベルは、パルスごとに大きく異なっている。パルスごとに、異なるスペックルパターンが生じているためと考えられる。すなわち、パルス毎に受信機の位置がパターンの明点と暗点との間で次々と切り替わっているのである。なお、高出力のパルスレーザーのため送信波形は安定しておらず、パルスごとに大きく異なる波形が送信されている。

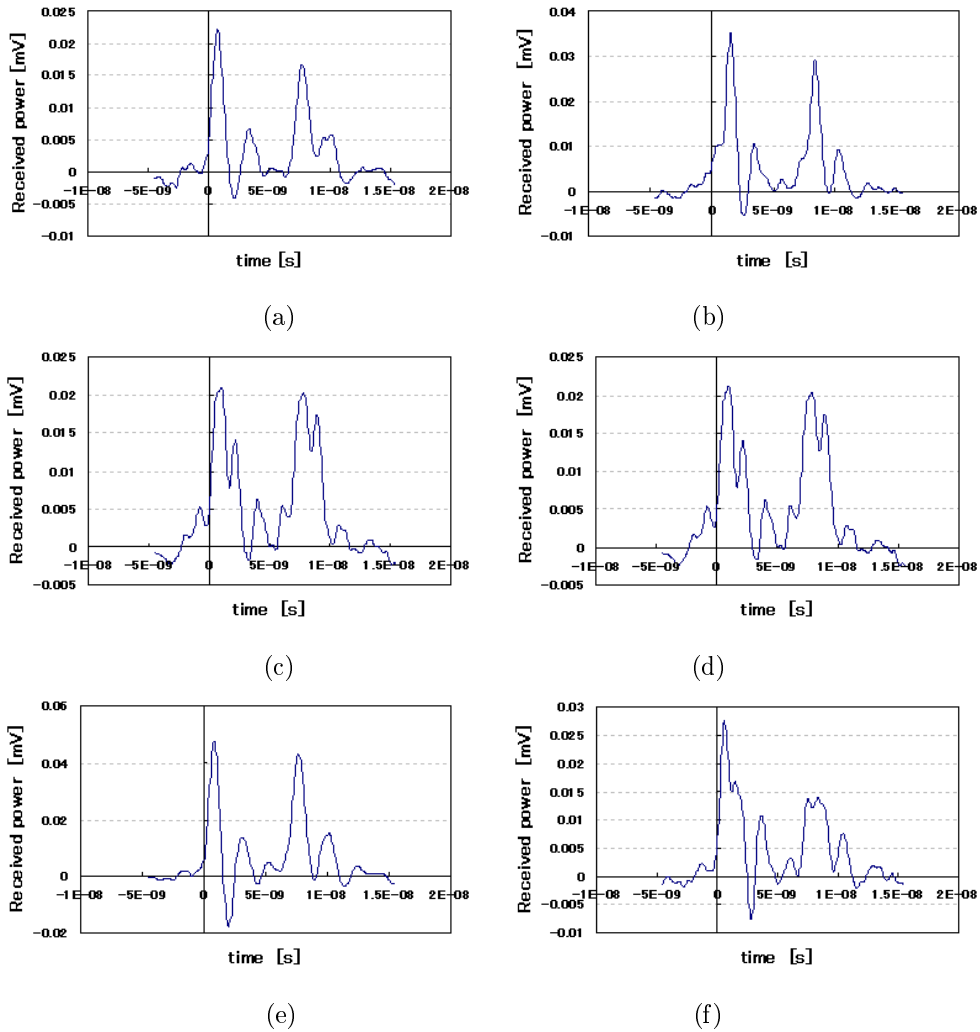


図 7.2: 送信、受信のパルス波形の比較

### 7.3 受信電力のパルス毎の変動

図 7.1 のレーザからパルス列を発生させ、受信される各パルス電力の変動を測定する。図 7.3 に送信光のパルス電力変動を示す。また、図 7.4、7.5 に、散乱物体が順に紙、紙やすりの場合の受信パルス電力を示す。

図 7.1 の送信電力はほとんど変動しないのに対して、図 7.4(a) においては、受信電力変動が平均値の 0.5 倍から 2.5 倍の範囲で大きく変動する。また、図 7.5(a) の紙やすりの場合では、平均値の 0.2 倍から 2.8 倍のさらに大きな範囲で変動する。パルス毎にスペックルパターンが変動し、受信機の位置において明点、暗点と次々に切り替わるためである。実際、測定中にパターンが次々と変化する様子が観測された。

図 7.4(a) には、1 パルス毎の短い時間スケールの変動と、数 10 パルス毎の長いタイムスケールでの変動の両者が存在する。時間的に早い変動は、パルス毎の照射位置の変動が原因と推測される。パルスレーザの送信角度の誤差により、照射位置が図 6.8 の  $\Delta X_{sat}$  を超えて変動するため、1 パルス毎にスペックルパターンが変化すると推測される。

一方、時間的に遅い変動は、レーザ光の照射による表面状態の熱的な変化が原因と推測される。連続パルス列により照射領域に蓄積される熱によって表面状態が変動し、スペックルパターンが変化していると考えられる。実験後に、紙については照射部分の変色が観測された。

紙やすりの場合においても同様に、図 7.5(a) 及び (b) において、1 パルス毎の変動と長い時間スケールの変動が存在する。ただし、後者の長い時間スケールの変動に関しては、変化の時間スケールがより長い。図 7.5(a) では、パルスナンバー:620~1000 において平均値の 0.5 倍程度の低いレベルにあり、(b) においても、パルスナンバー:0~380 において平均値の 0.7 倍程度の低いレベルに止まっている。紙やすりは、紙に比べて散乱表面が硬く変化しにくく表面状態の変化が生じにくいいため、より長い時間スケールで変化が生じていると推測される。

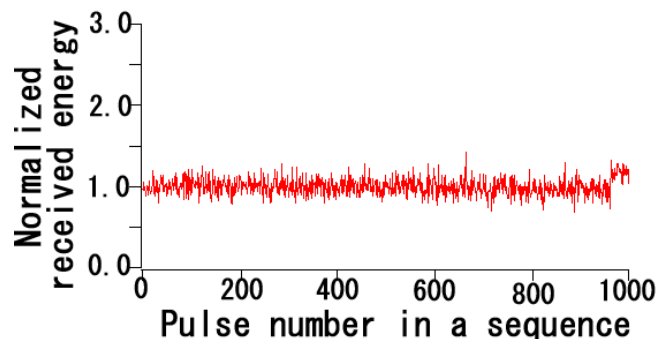
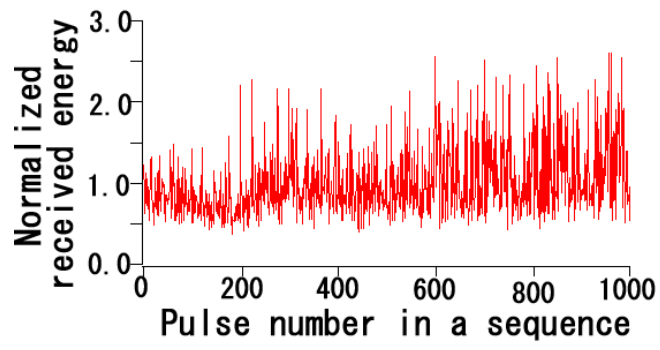
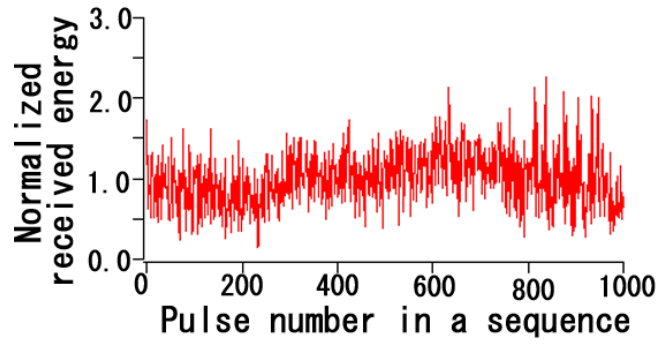


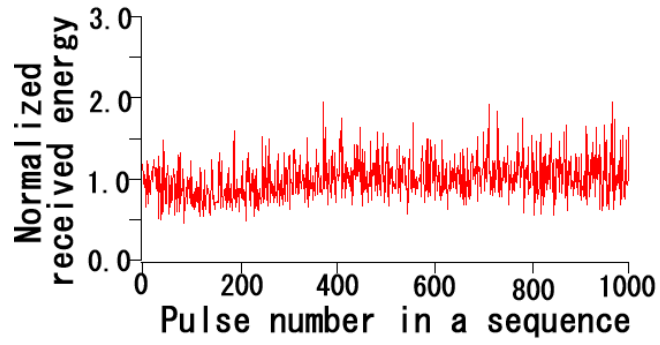
図 7.3: 送信電力のパルス間変動



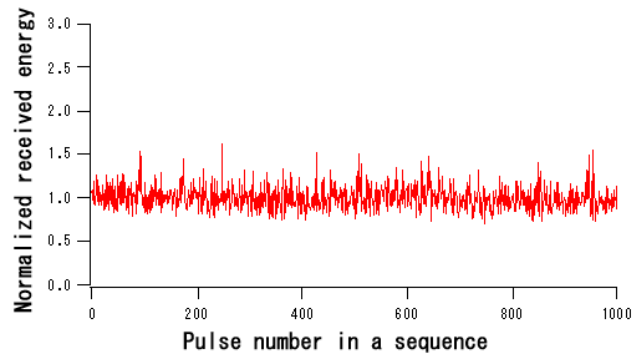
(a)  $D_{il}=0.3\text{mm}$



(b)  $D_{il}=0.6\text{mm}$

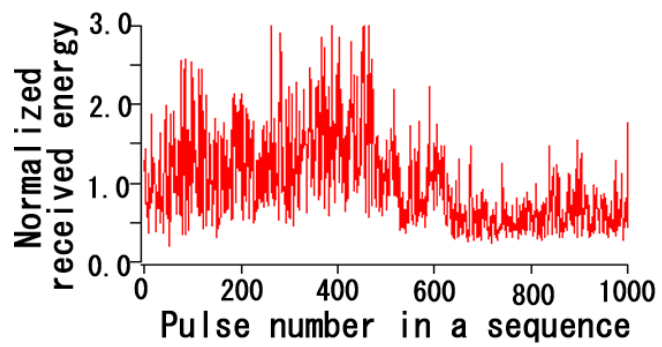


(c)  $D_{il}=2\text{mm}$

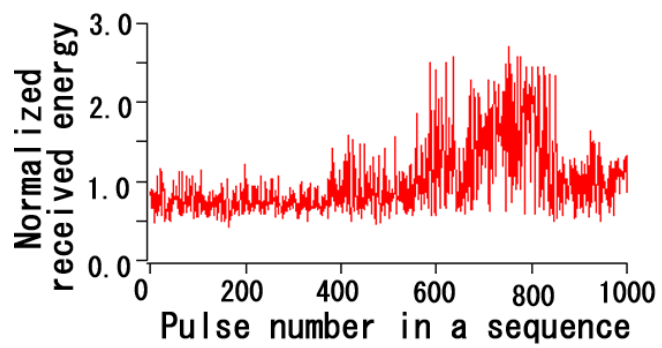


(d)  $D_{il}=10\text{mm}$

図 7.4: 受信電力のパルス間変動 (散乱物体: 紙)



(a)  $D_{it}=0.3\text{mm}$



(b)  $D_{it}=0.6\text{mm}$

図 7.5: 受信電力のパルス間変動 (散乱物体: 紙やすり)

## 7.4 受信電力変動の照射直径依存性

図 7.4 及び 7.5 において、照射直径の拡大によりパルス毎の受信電力が小さくなる。図 7.4(a) では受信電力は 正規化電力: 0.5~2.5 の範囲で変動するのに対し、(d) では正規化電力: 0.8~1.5 の範囲と小さくなり、図 7.3 の送信電力変動と同程度となる。照射直径に反比例してスペックルパターンマイクロサイズが小さくなり、受信開口内での平均化が生じるためである。

パルスレーザによる時間的な受信電力変動を、式 (5.1) の SC を用いて評価する。ただし、式 (5.1) の光強度  $I$  を受信パルス電力として計算する。

散乱物体が紙の場合の SC の照射直径依存性を、図 7.6 に示す。照射直径の 0.3mm から 2mm への増加により SC は 0.32 から 0.18 まで急激に減少する。また、照射直径 10mm から 14mm においては、SC=0.1 程度で現象が底打ちとなっている。図 7.3 の送信電力そのもののが、SC=0.08 とある程度の分散を持っているためである。

図 6.8 の  $R_{ob}=2m$  の場合のマイクロサイズの近似曲線より、 $D_{il}=10mm$  においてマイクロサイズは 0.5mm であり、受信開口直径の  $1/2$  となる。一方、図 7.6 より  $D_{il}=10mm$  では SC=0.11 となり、 $D_{il}=0.3mm$  における SC=0.32 の 30% 程度となっており、5 章の結論と一致する。

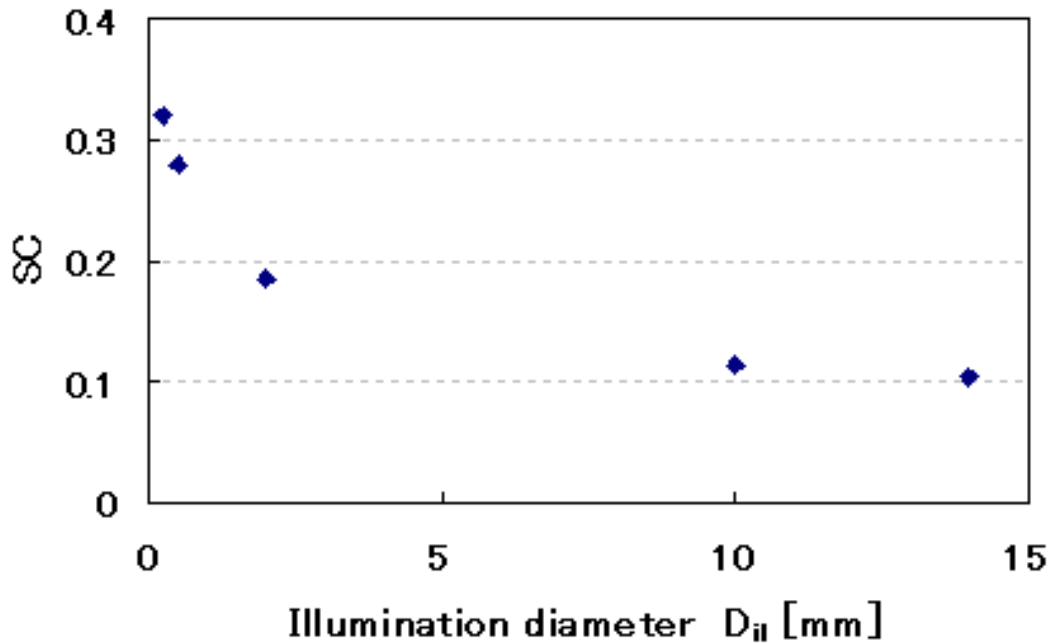


図 7.6: SC の受信直径依存性 ( $D_r = 1mm$ )

## 第8章 結論

本研究は、散乱光を受信するシステムへのスペックル現象の影響を明らかにするために行われた。スペックル現象に起因した受信電力変動の、対象物体及び送受信光学系における各種パラメータへの依存性、及びその評価法を検討した。パラメータは、(a) 照射領域の直径、(b) 散乱物体、(c) 受信開口直径、(d) 散乱物体上の照射位置変位、(e) 送信ビームの広がり角、及び (f) CW と Pulse レーザ、の6種類である。本研究により明らかとなったスペックル現象の特性及び受信電力への影響を、以下に示す。

1. スペックルパターンには、理論に対応した幅  $\frac{\lambda R_{ob}}{D_{il}}$  の空間周波数の高い成分（マイクロサイズ）に加えて、周波数の低い成分（マクロサイズ）が存在する。（ $\lambda$ :波長、 $R_{ob}$ :散乱物体・受信機間の距離、 $D_{il}$ :照射領域の直径）
2. パターン内でのマイクロサイズの分散を評価し、平均と同程度の大きな分散を持つことが示された。
3. マイクロサイズは照射領域の直径に反比例し、散乱物体には依存しない。
4. マクロサイズは照射直径に依存せず、散乱物体に依存し、今回測定を行った範囲では、木板の場合に顕著に現れる。
5. SC の受信開口依存性において、マイクロサイズの2倍の受信開口直径では、SC は最大値の30% 以下となる。一方、マイクロサイズ以上に受信開口を拡大する場合に、マクロサイズにより SC の減少が25% 程度抑えられる。なお、SC とはスペックル現象による受信電力変動の大きさを表す指標である。
6. 照射位置の変位による受信電力の変動は、(1) 散乱部分の変化による新たなパターン形成 と、(2) ターゲット変位に対応したパターンの平行移動、の2つにより引き起こされる。
7. パターンの明点、暗点の反転に必要なターゲットの変位の期待値  $\Delta X_{sat}$  は、照射直径の15% とマイクロサイズの内低い方の値となり、両者が一致する照射直径で極大となる。すなわち、当該一致点より小さい照射直径では、結論5の(1)の新たなパターン形成により  $\Delta X_{sat}$  が決まり、一方、一致点より大きい照射直径では、(2)のパターン平行移動により  $\Delta X_{sat}$  が決まる。
8. 照射位置変位によるスペックルパターンの変化には、照射光の位相曲面も影響しており、照射ビームの広がり角の、 $\Delta X_{sat}$  のピーク値は大きくなる傾向が見られた。ただし、十分な定量的比較はできていない。
9. 連続パルスレーザを用いた散乱光受信システムにおいては、スペックルパターンの変化により受信電力が変動する。ただし、パルス幅2ns という極めて短い時間内ではパターン変化は生じないため、本実験ではスペックルによる波形歪は生じていない。

10. 上記変動には時間スケールの短いものと長いものが存在し、前者はレーザ照射角度のパルス間誤差、後者は連続パルス光により蓄積された熱による表面状態の変化が原因と推測される。
11. パルス間受信電力変動より求められる SC の照射直径依存性は、CW レーザによる空間的な光強度変動の測定から求められる SC の特性と一致する。

今後の課題としては 2 つの事項が挙げられる。1 つ目は、より実際のシステムに近いパラメータでの特性評価である。本実験では、照射領域の直径が  $0.3\text{mm} \sim 25\text{mm}$  の範囲で測定を行った。この範囲は、拡散型光無線 LAN 等の室内におけるアプリケーションでは十分であるが、レーザレーダ等の遠距離における計測や通信では照射直径が数 m となる場合もあり、直接当てはめることはできない。

2 つ目は、スペックルによる受信誤りの軽減法である。本研究における照射位置変位によるパターン変動は、1 つの有効な対策ではある。すなわち、照射位置変位により受信機の位置を暗点から明点に反転させることができる。しかし、そのような方法は、レーザレーダのような連続パルスのうち 1 つでも受信できれば良い場合には有効だが、通信のように次々と情報を送りたい場合には適しない。

今後は、そのような実際に用いられるシステムに即した評価及び対策が必要である。

## 参考文献

- [1] Takano Tadashi "*Lightwave Wireless Communications and Infrared Technologies* Journal of the japan society of infraed science and technology, vol.13,no.2,p6-11,2004
- [2] 宇田 新太郎"レーザと光通信" 丸善株式会社,1973
- [3] J.C.Dainty "*Laser Speckle and Related Phenomena*" Springer-Verg Berlin Heidelberg NewYork,1975
- [4] Jhon R.Barry "*Wireless Infrared Communications*". Kluwer Academic Publishers.
- [5] J.W.Goodman "*Some effects of target-induced scintillation on optical radar performance*" Proceeding of IEEE,vol.53,no.11,p1688-1700,1965
- [6] Sandor Der, Brian Redman, Rama Chellappa "*Simulation of error in optical radar range measurements*" Applied optics,vol.36,no.27,p6869-6874,1997
- [7] Y.Toyoshima, T.Inaba and T.Takano "*Experimental Study on Speckle Patterns of Laser Light in the Far Range*" Proceeding of ISAP,p837-840,2004
- [8] Hitoshi Fujii,Toshimitsu Asakura "*Roughness mesasurements of metal surfaces using laser speckle*" J.Opt.Soc.Am.,vol.67,no.9,September 1977
- [9] Takashi Okamoto,Shuta Yanagita "*Intensity correlations of coherent light reflected from dense powders*" Optics Communications 227,p14-23,2003
- [10] Peter Lehmann "*Surface-roughness measurement based on the intensity correlation function of scattered light under speckle-pattern illumination*" Applied optics,vol.38,no.7,March,1999
- [11] Yamaguchi I "*Real-time measurement of in-plane translation and tilt by electronic speckle correlation*" Jpn J Appl Phys,vol19,no.3,p133-135,1980
- [12] Hitoshi Fuujii,Naoki Konishi "*Visualization of blood flow distribution using laser scattering phenomena*" Jpn J Appl Phys,vol.66,no.5,p476-480,1997
- [13] Y.Piederriere, J.Le Meur, J.Cariou "*Particle aggregation monitoring by speckle size measurement; Application to blood platelets aggregation*" Optics Express,vol.12,no.19,p4596-4601,2004
- [14] J.W.Goodman "*Statistical Properties of laser speckle pattern*" in Laser Speckle and Related Phenomena, Springer-Verlab Verlin Heidelberg NewYork 1975
- [15] MUSES-C 飛翔実験計画書,p.637-641, 宇宙科学研究所 SES データセンター



## 発表文献

1. 稲葉 崇, 高野 忠, ”スペックル現象における光強度分布の照射面積依存性” 電子情報通信学会総合大会, B-1-14, 2005.3.21
2. Takashi Inaba, Hiroo Kunimori, Tadashi Takano, ”Study of Speckle Phenomena - Dependence on an Irradiated Area Size and the Effects in a Laser Radar” Proceeding of ISAP2005
3. 稲葉 崇, 高野 忠, ”スペックル現象における受信電力変動の受信開口依存性” 電子情報通信学会 ソサエティー大会, B-1A, 2005.9.21
4. 稲葉 崇, 高野 忠, 国森 裕生, ”スペックル現象によるレーザ光受信電力変動の照射体及び送受信系依存性” 電子情報通信学会論文誌 (投稿中)

# 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの適切なご指導を頂きました担当教官の高野忠先生に深く感謝いたします。情報通信科学研究所での実験に当たっては、当研究所の国森裕生様到大変お世話になりました。また、実験装置に関する相談にのってもらった宗正君を始めとして、有用な助言をくれた研究室の皆様に深く感謝いたします。

最後に、これまで自分を支援してくてくれた両親に深く感謝いたします。